

中国科学引文数据库核心期刊

中文核心期刊

中国科技核心期刊

ISSN 1006-7647  
CN 32-1439/TV



河海大学 主办  
HOHAI UNIVERSITY



# 水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2023年3月

第43卷 第2期

Vol. 43 No. 2

# 《水利水电科技进展》第六届编辑委员会

顾问：（以姓氏笔画为序）

孔宪京 王思敬 邓铭江 卢耀如 朱尔明 吴中如 张长宽 张建民 张超然 李华军  
汪集旻 陆佑楣 陈厚群 陈祖煜 周君亮 姜弘道 胡四一 索丽生 贾金生

主任委员：徐 辉

副主任委员：沈凤生 郑金海

委员：（以姓氏笔画为序）

王卫光 王小毛 王仁坤 冯树荣 冯夏庭 包腾飞 左其亭 任国玉 刘汉龙 刘 军  
刘 成 孙才志 孙树林 朱振家 吴时强 吴建华 吴普特 张国新 张宗亮 张春生  
李保国 杨志峰 杨泽艳 汪基伟 苏怀智 迟世春 陆永军 陈云敏 陈龙珠 陈求稳  
陈国兴 陈 喜 周惠成 林 涛 林绍忠 林鹏智 练继建 郑东健 金伟良 金 峰  
金菊良 姚文艺 姜文来 姜翠玲 胡春宏 胡铁松 钟德钰 钮新强 骆 超 徐世焯  
徐宗学 柴军瑞 秦伯强 钱向东 顾冲时 高广运 康绍忠 盛金昌 黄岁樑 龚 政  
景来红 蒋林华 谢新民 鲁春辉 雍 斌

主 编：顾冲时

副 主 编：苏怀智 骆 超

## 致 作 者

为方便作者投稿，特将本刊的性质和对稿件的要求简要介绍如下：

- 1 本刊是一份科学技术期刊，主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境、水管理等有关的科技论文。因此，要求稿件内容有明确的主题，所介绍的科学技术有明显的创新性、先进性和实用性。
- 2 本刊欢迎下列内容的稿件，特别欢迎各类基金资助项目及其他重大科技项目的研究论文。
  - (1) 水资源利用、配置、节约和保护，包括：水资源形成、可再生性维持机理及时空变化规律；变化环境下的水循环及其伴生过程演化机理；水资源利用与生态保护的协调关系；河湖水系连通的水资源布局 and 调配；地表水、地下水及非传统水资源综合利用与调配；大区域干旱演变规律及风险评估；水资源的可持续利用方式及新型水资源的开发利用等。
  - (2) 大江大河的综合治理，包括：流域综合治理中的重大水利科技问题及关键技术；大型水工程对河流生态系统的影响；江河防洪减灾应急处置技术及机制；江河水沙调控及泥沙资源化利用；水土流失侵蚀机理和产沙规律等。
  - (3) 水利工程建设，包括：300 m 级高坝筑坝技术；水工程安全诊断、评估与修复；大型调水工程建设与安全运行；高海拔、冻土、地震频发区等复杂条件下水工程建设与安全防护；中小型水库、水闸、堤防安全诊断和除险加固的新材料新技术等。
  - (4) 水环境与水生态保护，包括：重大水工程环境与生态效应评价及调控；河湖健康评估技术体系与评价标准；饮用水水源地安全综合保障机制；区域水资源保护和水域生态系统修复；城市水环境综合治理；内陆核电建设对水资源安全的影响等。
  - (5) 河湖治理及海岸防护，包括：河口海岸治理和滩涂资源的保护利用；河口海岸滩涂演化与海岸侵蚀防护；通江湖泊的江湖关系及水资源调配与防洪调度；风暴潮预报预警与风险评估；河道整治及中小河流综合治理；河湖疏浚与底泥的处置利用等。
  - (6) 水管理及水利信息化，包括：重大突发水事件的应急管理机制及对策；水权、水价、水市场的理论与实践；大中型灌区节水改造；数字化流域；采用 3S 技术、云计算技术、物联网技术等对传统水利实施技术改造等。
- 3 对稿件的一般要求如下（详见本刊《征稿简则》）：
  - (1) 研讨“水问题”的稿件，应力求观点鲜明，论证充分，有独到见解和指导意义。
  - (2) “研究探讨”类稿件，应报道作者科学研究中取得的科技新成果，包括有推广价值的新技术、新方法、新产品、新工艺、新材料等原创性成果。
  - (3) “工程技术”类稿件，应报道工程规划、勘察、设计、施工、管理中具有创新性的技术和方法，包括有推广价值的技术革新成果和成功经验。
  - (4) “专题综述”类稿件，应对某一学科、某一研究对象或某项技术的现状与发展进行综合分析和评述，力求以丰富、翔实、最新的文献资料作为综述的依据，并阐明作者自己的见解或观点。
  - (5) “国外动态”类稿件，一般以“编译”或“摘译”的形式介绍国外相关学科或工程建设的新进展。摘编时应注明原文出处，尊重原文的版权。

# 水利水电科技进展

(1981 年创刊, 双月刊)  
第 43 卷第 2 期

# 2023

2023 年 3 月 10 日出版

SHUILI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊  
中文核心期刊(2004—2023)  
中国科技核心期刊(2003—2023)  
中国高校百佳科技期刊  
中国高校优秀科技期刊  
全国水利系统优秀科技期刊  
江苏省优秀期刊

刊名题写 **钱正英**

顾问 孔宪京 王思敬 邓铭江  
卢耀如 朱尔明 **吴中如** 张长宽  
张建民 张超然 李华军 汪集旸  
陆佑楣 陈厚群 陈祖煜 周君亮  
姜弘道 胡四一 索丽生 贾金生  
编委会主任 徐 辉  
主 编 顾冲时  
副 主 编 苏怀智 骆 超  
责任编辑 熊水斌  
英文编辑 朱 海

主 管: 教育部  
主 办: 河海大学  
编辑出版: 《水利水电科技进展》编辑部  
地 址: 210098 南京市西康路 1 号  
电 话: 025-83786335  
电子邮箱: jz@hhu.edu.cn  
网络地址: http://jour.hhu.edu.cn  
印 刷: 南京鸿润印刷有限公司  
发行范围: 公 开  
国内发行: 中国邮政集团公司江苏省分公司  
订 阅: 全国各地邮局  
邮发代号: 28-244  
国外发行: 中国国际图书贸易总公司  
(北京 399 信箱 100048)  
国外发行代号: BM2740  
广告许可证: 苏工商 3200004960327  
中国标准连 ISSN 1006-7647  
续出版物号: CN 32-1439/TV  
CODEN: SSKJAT  
国内定价: 15.00 元

# 目 次

## · 研究探讨 ·

- 钩环式护圈对冰盖下桥墩局部冲刷影响的试验研究  
…… 牟献友, 陈秉如, 高鹏程, 李扒栓, 罗红春, 冀鸿兰(1)
- 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟  
… 曾 诚, 尹雨然, 陈 辰, 周 婕, 邱 斐, 白一墨, 王玲玲(9)
- 连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟  
…… 陆圣杰, 朱 海, 徐洁如, 王玲玲, 华祖林, 武显扬(16)
- 基于分位数回归的升船机变形监控模型构建方法  
…… 杨晨昊, 郑东健(27)
- 后峰型降雨条件下地基瞬态极限承载力解析解  
…… 秦卫星, 邓传雄, 胡惠仁, 熊轩宇, 刘泽辰(33)
- 水性环氧砂浆与混凝土界面剪切性能试验研究 … 张 雷,  
黄飞亚, 张英豪, 曹建国, 吴安兴, 赛米·艾木都立, 刘 东(39)
- 基于改进响应面的邓肯-张 E-B 模型参数全局敏感性分析  
…… 冯亚新, 江兆强, 孙一清,  
王润英, 沈振中, 徐力群, 甘 磊, 李皓璇, 刘 源, 桂靖鹏(44)
- 掺水泥粉土的改良风积沙三轴压缩特性  
…… 刘万乐, 田正宏, 鲁 洋, 许 健, 巩转定, 吴彦军(51)

## · 工程技术 ·

- 鄂西山区农村生活污水处理及排放状况调查研究  
…… 王 煜, 郑 伟, 卢晓春, 李 宁, 杨 超(58)
- 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法  
…… 沈添耀, 董海洲(63)
- 多含水层渗流系统电导示踪模型  
…… 柴 栋, 方广涛, 邱春雄, 董海洲, 张利民, 张博宇(70)
- 基于 LSTM 的泵闸工程混凝土施工期温度场预测  
…… 程 井, 孔垂穗, 邹科辉(76)
- 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选  
…… 杨志豪, 何建新, 李志华, 杨 武, 卢建南(82)
- 混凝土防渗面板裂缝综合无损检测技术研究  
…… 邹晨阳, 张双喜, 陈 芳(89)

## · 大坝安全专栏 ·

- 基于混合注意力机制和深度学习的大坝变形预测模型  
…… 向镇洋, 包腾飞, 白妍丽, 宋宝钢, 王瑞婕(96)
- 基于聚类分区和 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型  
…… 刘伟琪, 陈 波, 葛盼猛, 张晓玲(102)
- 大坝变形监测异常数据识别和重构模型  
…… 黎 祎, 赵二峰, 何 菁(109)
- 南水北调东线工程江苏段淮安水利枢纽  
…… 摄影: 孟 凯(封面)

## CONTENTS

Experimental study of influence of ridged collar on local scour of bridge piers under ice sheet .....	MOU Xianyou, et al( 1 )
Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow .....	ZENG Cheng, et al( 9 )
Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel .....	LU Shengjie, et al(16)
Construction method for ship lift deformation monitoring model based on quantile regression .....	YANG Chenhao, et al(27)
Analytical solution of transient ultimate bearing capacity for foundation under delayed-peak pattern rainfall infiltration .....	QIN Weixing, et al(33)
Experimental study on shear performance of waterborne epoxy mortar and concrete interface .....	ZHANG Lei, et al(39)
Global sensitivity analysis of parameters in Duncan-Chang E-B model based on improved response surface .....	FENG Yaxin, et al(44)
Study on triaxial compression characteristics of improved aeolian sand mixed with cement silt .....	LIU Wanle, et al(51)
Investigation on rural domestic sewage treatment and discharge conditions in montane of western Hubei .....	WANG Yu, et al(58)
Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method .....	SHEN Tianyao, et al(63)
Electric conductivity tracer model of a multi-aquifer seepage system .....	CHAI Dong, et al(70)
Temperature field prediction during concrete construction period of pump and sluice project based on LSTM .....	CEHNG Jing, et al(76)
Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis .....	YANG Zhihao, et al(82)
Study on integrated non-destructive inspection technology for impervious concrete panel cracks .....	ZOU Chenyang, et al(89)
Dam deformation prediction model based on mixed attention mechanism and deep learning .....	XIANG Zhenyang, et al(96)
Deformation prediction model of a high arch dam based on clustering and MO-LSSVR .....	LIU Weiqi, et al(102)
Abnormal data identification and reconstruction model of dam deformation monitoring .....	LI Yi, et al(109)

---

**Sponsor:** Hohai University

**Editor & Publisher:** Editorial Board of Advances in  
Science and Technology of Water Resources,  
Hohai University

**Editors in Chief:** XU Hui, GU Chongshi

**ISSN** 1006 – 7647    **CN** 32 – 1439/TV

**Address:** 1 Xikang Road, Nanjing 210098, P. R. China

**E-mail:** jz@hhu.edu.cn

**http:** //jour.hhu.edu.cn

**Distributor:** China International Book Trading Corporation  
(P. O. Box:399, Beijing 100048, P. R. China)

**Issue Code:** BM2740    **CODEN:** SSKJAT

# 钩环式护圈对冰盖下桥墩局部冲刷影响的试验研究

牟献友<sup>1</sup>, 陈秉如<sup>1</sup>, 高鹏程<sup>1</sup>, 李扒栓<sup>2</sup>, 罗红春<sup>1</sup>, 冀鸿兰<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 呼和浩特市托克托县乡村振兴统筹发展中心, 内蒙古 托克托 010200)

**摘要:** 基于桥墩局部冲刷原理, 在水平护圈防冲措施的基础上, 设计了一种能改变桥墩周围水流流态的新型防冲设施—钩环式护圈。为探究钩环式护圈对圆柱形桥墩局部冲刷的防护效果, 采用不同形状的钩环式护圈进行室内物理模型试验, 分析了桥墩周围的冲刷特征和水力特性。试验结果表明: 当钩环式护圈的高度为 1 cm、角度为 135°且安装在床面时, 防护效果最好; 与光墩相比, 桥墩安装钩环式护圈后, 最大冲刷深度最多可减小 62.2%, 桥墩底部垂向流速、垂向紊动强度均明显减小。通过多元回归分析建立了计算桥墩周围无量纲最大冲刷深度的经验方程, 该方程对明流和冰盖条件下水流均适用。

**关键词:** 桥墩冲刷; 钩环式护圈; 冰盖; 冲刷特征; 水力特性; 最大冲刷深度

中图分类号: TV131.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)02-0001-08

**Experimental study of influence of ridged collar on local scour of bridge piers under ice sheet**//MOU Xianyou<sup>1</sup>, CHEN Bingru<sup>1</sup>, GAO Pengcheng<sup>1</sup>, LI Bashuan<sup>2</sup>, LUO Hongchun<sup>1</sup>, JI Honglan<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Hohhot Togtoho County Rural Revitalization Coordinated Development Center, Togtoho 010200, China)

**Abstract:** Based on the principle of local scour of bridge piers, and on the basis of the anti-scour measures of horizontal collars, a new anti-scour protection measure, called ridged collar, which can change the water flow around the piers was designed. In order to explore the protective effect of the ridged collar on the local scour of cylindrical bridge piers, indoor physical model tests were conducted using ridged collars of different shapes, and the scour characteristics and hydraulic properties around the pier were studied. The test results show that, the protection effect is the best for a ridged collar installed on the bed surface with a height of 1 cm and an angle of 135°. Compared with cases of no protective measures, after the ridged collar is installed on the bridge pier, the maximum scour depth reduction can reach 62.2%, and the vertical flow velocity and vertical turbulence intensity at the bottom of the pier can be significantly reduced. Through multivariate analysis, an empirical equation for calculating the non-dimensional maximum scour depth around the pier is established, which is applicable to both open channel flows and flows under ice sheet.

**Key words:** bridge pier scour; ridged collar; ice sheet; scour characteristics; hydraulic properties; maximum scour depth

桥梁作为跨江、河、海的人工建筑物, 往往因自然灾害以及防护不力等遭到破坏<sup>[1]</sup>。洪水和桥墩冲刷是桥梁水毁的主要原因。湖南省高速公路管理局对 320 多座桥梁进行了检查, 发现大多数桥墩存在不同程度的冲刷现象<sup>[2]</sup>。国内外学者对桥墩周围的冲刷机制进行了广泛的研究, 发现墩前下潜流和底部马蹄形漩涡是造成桥墩局部冲刷的主要原因<sup>[3]</sup>。北方寒区河流冬季常形成冰盖, 冰盖的存在使得断面最大流速点更靠近河床, 泥沙更容易起动,

加剧了桥墩附近的局部冲刷<sup>[4]</sup>。1987 年 4 月, 纽约州高速公路上的斯科哈里大桥因桥墩基础被冰盖下水流冲刷导致桥梁倒塌, 事故造成多人丧生<sup>[5]</sup>。桥梁在寒冷地区的建设与冰盖、冰塞紧密相关, 冰盖下桥墩局部冲刷是一个持续存在且危及社会财产和公共安全的问题<sup>[6]</sup>。因此, 对冰盖下桥墩局部冲刷防护的研究亦不容忽视。

桥墩局部冲刷的防护措施主要分为实体抗冲和减速不冲两类<sup>[7]</sup>。实体抗冲是对桥墩周围河床施

基金项目: 国家自然科学基金(52169017, 51969020); 内蒙古自治区应用技术与开发资金项目(201802104)

作者简介: 牟献友(1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程水力学与河流冰情研究。E-mail: mouxianyou@163.com

通信作者: 陈秉如(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事寒旱区桥墩冲刷及防护研究。E-mail: 913034810@qq.com

加防护层,通过防护层自身的抗冲能力来保护河床不受冲刷,主要包括抛石、扩大桥墩基础、混凝土铰链等,虽然构造简单、方便施工,但存在整体性较差、造价高、防护易失效等问题<sup>[8]</sup>。减速不冲是通过减弱下潜流以及马蹄形漩涡的强度从而减小冲刷,较实体抗冲防护更为经济、有效,具有更好的应用前景<sup>[9]</sup>。减速不冲防护措施主要包括墩体开缝、基础沉箱防护和水平护圈防护等,国内外学者针对减速不冲防护措施做了大量研究。例如:Kumar<sup>[10]</sup>研究了墩体开缝对桥墩局部冲刷的影响,结果表明,开缝防护可减小下降水流的淘刷力,也能减弱桥墩周围马蹄形漩涡的强度;Wei等<sup>[11]</sup>基于基础沉箱防护措施提出了一种新型的裙摆式沉箱设计,并针对装有裙摆式沉箱的桥墩的局部冲刷进行了一系列试验和数值研究,表明裙摆式沉箱优化了基础沉箱的防护效果。

水平护圈属于减速不冲防护措施,当其被安装在桥墩上时,可以防止下降水流对河床的直接冲击,从而降低最大冲刷深度和冲刷速率。许多学者对其单独使用时或与其他防护措施组合使用时的防护效果进行了研究。例如:Kayaturk等<sup>[12]</sup>研究了装有水平护圈的桥台周围河床的局部冲刷随时间的发展变化;Wang等<sup>[13]</sup>基于动床冲刷试验,通过对比圆柱形桥墩的局部冲刷,研究了水平护圈的安装位置、护圈直径和保护范围对桥墩局部冲刷防护效果的影响,结果表明,处在最优工况的水平护圈可使桥墩的局部冲刷减小一半以上。张万锋等<sup>[14]</sup>在水平护圈的基础上设计了环翼式防冲板,通过室内试验得出,环翼式防冲板可阻挡墩前下潜流,减弱桥墩周围马蹄形漩涡的强度,相比水平护圈,其制作、安装更为方便,但两者都存在阻挡后的下降水流不能快速到达下游,易导致局部水流紊动的问题;针对此问题,牟献友等<sup>[15]</sup>提出将环翼式防冲板与墩身开缝结合进行组合防护,弥补了环翼式防冲板的缺陷,但也导致墩侧的紊动强度增大,冲刷加深;Chen等<sup>[16]</sup>基于水平护圈的防护原理设计了领式护圈,采用Flow-3D模拟明流条件下装有领式护圈的桥墩周围河床的局部冲刷,发现安装领式护圈的桥墩墩前下降流量明

显减小,马蹄形漩涡的强度也相应减小,但Saadati等<sup>[17]</sup>指出,行进水流与垂直的领式护圈相遇会造成上游水流紊动,导致防护作用减弱。

为解决受阻挡后的下降水流不能快速到达下游和桥墩周围水流紊动的问题,本文针对水平护圈防冲措施进行改良,设计新型防冲设施——钩环式护圈,探究明流及冰盖条件下的冲刷防护效果。钩环式护圈的设计原理是改变桥墩迎水面的水流流态,通过钩环偏转水流的作用,减弱桥墩周围的水流紊动,弥补水平护圈的缺陷。

## 1 试验装置及方案

### 1.1 试验装置及模型

试验在内蒙古农业大学水利实验室中进行,试验装置布置如图1所示,水槽长21.6 m,宽1.0 m,高0.65 m,水槽底坡为0.124%,配有独立的供水循环系统。水槽内的流量由上游安装的300HW-8型电磁流量计及下游安装的水位计联合调控,水槽尾部装有可调节的尾门,用以调节水槽内的水深及流速。水槽上方装有Vectrino+型声学多普勒点式流速仪,用以测量水流流速。水槽侧壁每隔1.2 m间距设置垂向刻度标线,作为水流和河床高程沿程校核的依据。试验段铺设长8.4 m、厚0.2 m的均质模型试验沙,参照前人对寒区冰盖下桥墩冲刷的试验用沙粒径<sup>[18-20]</sup>,筛取0.34~1.28 mm粒径的沙进行试验,筛余后测得粒径 $d_{50}$ 为0.61 mm(沙粒间的黏性力可忽略<sup>[21]</sup>),所用泥沙的不均匀系数为4.385,曲率系数为1.066。桥墩位置固定在试验段的中心处,冰盖采用石蜡块模拟。

试验选用圆柱形桥墩,材料为PVC,根据前期野外原型观测,结合水槽尺寸进行模型比尺计算,设计桥墩直径 $D$ 为6 cm。根据Ettema<sup>[22]</sup>的研究,为避免泥沙粒径影响桥墩周围的最大冲刷深度,桥墩直径与泥沙中值粒径之比应大于50,试验中该比值取98.36;Shen等<sup>[23]</sup>指出,当水槽宽度与桥墩直径之比大于8时,可忽略水槽侧壁的阻塞效应,试验中该比值取16.67。钩环式护圈模型由PVC板材制成,其模型结构如图2所示,底部水平护圈的延伸半径 $r$

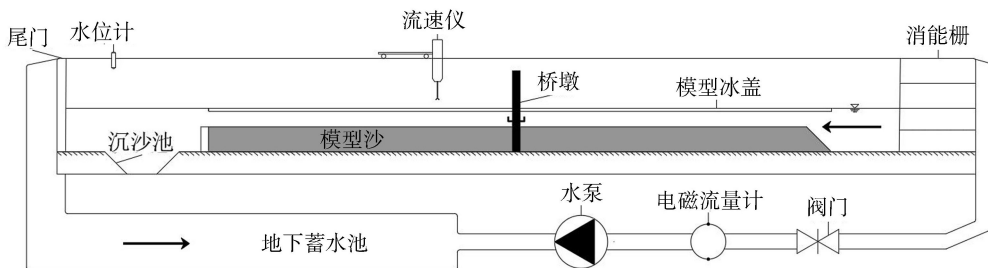


图1 试验装置布置

根据成兰艳等<sup>[24]</sup>的研究取 3 cm, 钩环的高度  $i$  分别取 1 cm、1.5 cm、2 cm 和 3 cm, 钩环的角度  $t$  分别取 45°、90°和 135°, 钩环式护圈的安装位置与床面的距离  $p$  分别取 0 cm、2.5 cm 和 5 cm。

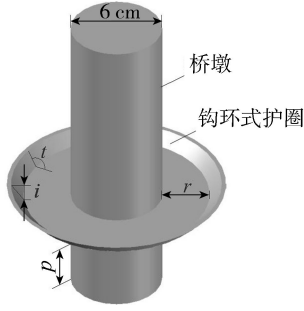


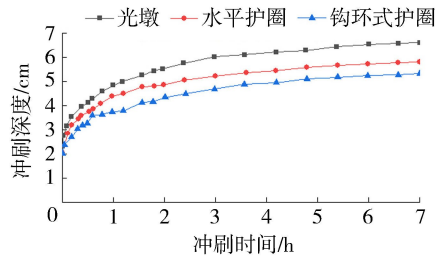
图2 钩环式护圈模型

## 1.2 试验方案

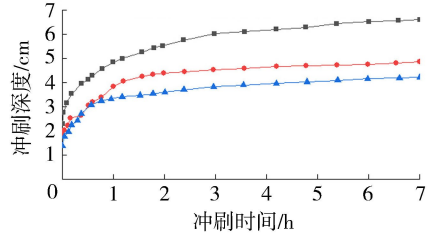
试验采用9种形状的钩环式护圈、3个不同的安装位置以及明流和冰盖两种条件共54种工况进行冲刷试验,并与光墩和水平护圈工况作对比,探究具有最优防护效果的钩环式护圈形状。根据Melville等<sup>[25]</sup>的研究,当水深与桥墩直径之比小于6时,水深不影响达到冲刷平衡的时间,试验水深  $h$  取 15 cm,与桥墩直径的比值为 2.5。试验在清水冲刷条件下进行,研究表明,床面泥沙启动可以用临界希尔兹数来确定<sup>[26]</sup>,根据文献<sup>[27]</sup>给出的公式,结合预实验观测到的实验现象,取流速  $u$  为 0.3 m/s,由Melville等<sup>[25]</sup>的研究可知,天然情况下,需要经过多次动床冲刷才能达到最大的清水冲刷深度,因此,本文试验结果亦适用于动床冲刷条件。

每个工况开始前,先将试验段床沙铺平,用木板按压夯实,并比对水槽侧壁的垂向标尺,确保河床高度沿程一致,把桥墩模型预先置于试验段中心,以此保证水槽上游来流到达试验桥墩位置时有较好的均匀度,以小流量进水直至水深达到试验设计值,然后放置模型冰盖,调节流量至设计值,开始试验。冰盖下桥墩墩前最大冲刷深度随时间的变化如图3所示,试验进行6 h后,随着冲坑深度和范围扩大,床面抗冲刷能力增大,冲坑内部沙粒只在坑内往复移动,不再移至坑外,且冲坑尾部堆积物形态及高度基本不再发生变化,桥墩冲刷达到平衡状态<sup>[28]</sup>,因此,每个工况冲刷时间均为7 h。在试验结束前的1 h,测量桥墩周围的流速。流速测点分布如图4所示,平面上,垂直水槽侧壁方向设置断面 I ~ V,平行水流方向设置测线 1 ~ 5,断面与测线的交点即为平面上的测点;由于冰盖下表层水流流速测量不便,为保证试验数据的准确性,每个断面与测线的交点沿水深方向设置7个测点。试验结束后,关闭尾门和水泵,缓慢排干水,保持地形不被破坏,使用探针(精

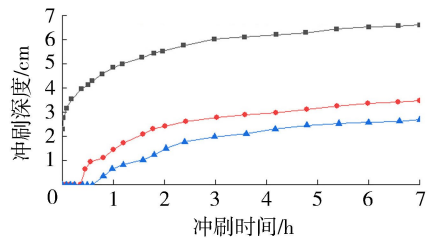
度 0.1 mm)测量桥墩周围的冲刷深度。



(a)  $p=5$  cm,  $t=135^\circ$ ,  $i=1$  cm

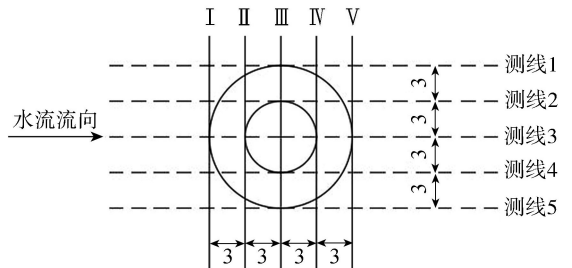


(b)  $p=2.5$  cm,  $t=135^\circ$ ,  $i=1$  cm

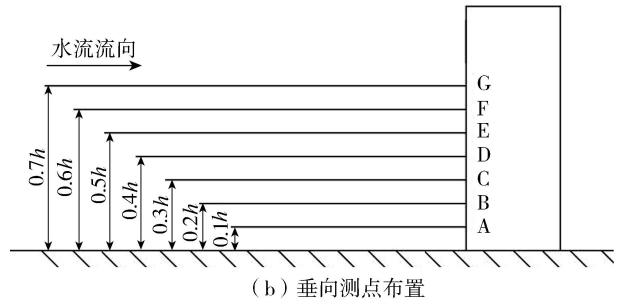


(c)  $p=0$  cm,  $t=135^\circ$ ,  $i=1$  cm

图3 墩前最大冲刷深度随时间的变化



(a) 平面测点布置 (单位: cm)



(b) 垂向测点布置

图4 流速测点分布

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冲刷进程

冰盖条件下,钩环式护圈安装在床面和床面以上位置,冲刷达到平衡状态后,桥墩局部冲坑形状如图5所示( $x$ 为冲坑各点到冲坑前缘的距离, $y$ 为冲坑各点到水槽断面中点的距离)。钩环式护圈安装

在床面上时,冲刷首先发生在桥墩下游两侧,然后沿护圈边缘从两侧迅速发展至上游,在钩环式护圈周围形成一个环状凹槽。同时,桥墩尾部泥沙沉积物开始在此处堆积;在冲刷发展至接近平衡状态时,桥墩下游两侧至上游的凹槽加宽、加深,桥墩尾部堆积有一条细长的泥沙沉积脊,冲坑形状大体上沿桥墩中心线对称。当钩环式护圈安装在距沙床 5 cm 或 2.5 cm 处时,冲刷首先发生在桥墩上游两侧,之后沿桥墩侧面向下游延伸,冲坑内的沙粒在桥墩下游位置堆积,冲刷速度在开始阶段较快,之后逐渐变缓,当冲刷达到平衡状态时,桥墩周围冲坑变得更宽、更深,桥墩下游堆积形成马蹄形沙丘,这与光墩工况基本相同,王飞等<sup>[29]</sup>模拟的明流条件下光墩局部冲刷也具有相似的冲刷过程。对比无防护工况,3 种安装位置的冲坑深度均有不同程度减小,当护圈安装在床面时,墩后堆积物高度最低,长度最长;护圈安装在床面以上位置时,墩后堆积物高度和长度相比无防护工况均减小。

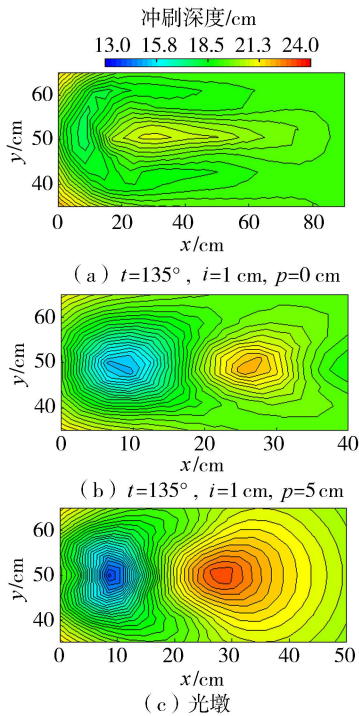


图5 局部冲坑形态

明流条件下,装有钩环式护圈桥墩局部冲刷进程的发展和达到平衡状态后局部冲坑的形态与冰盖条件几乎一致,但明流条件下,局部冲刷深度的发展要慢一些,且达到冲刷平衡的时间更短。

## 2.2 冲坑特征

以 1.0 cm 高的护圈为例,明流和冰盖条件下各形状护圈在不同安装位置时的最优工况结果见表 1,与光墩相比,钩环式护圈及水平护圈均具有一定的保护作用。钩环式护圈安装在沙床面时,防护

效果最佳,明流条件下,最大冲刷深度减小率最高可达 62.2%,冰盖条件下,最大冲刷深度减小率最高可达 59.1%;随着护圈安装位置的上移,最大冲刷深度逐渐增大,且明流与冰盖条件下防护效果的差距亦逐渐增大,原因是钩环式护圈与沙床面之间的空间会在桥墩迎水面产生下降水流,在桥墩周围形成马蹄形漩涡,从而导致冲刷的加深<sup>[30]</sup>,且冰盖的存在使得断面最大流速点下移,导致底部冲刷的进一步加深。换言之,当钩环式护圈安装在床面上时,沙床上方的漩涡和下降水流能被钩环式护圈有效阻挡,从而使得冲刷深度减小。因此,钩环式护圈的最佳安装位置为沙床面。

表 1 各形状护圈不同安装位置时的最大冲刷深度及减小率

防冲措施	钩环角度/ (°)	护圈安装位置/cm	最大冲刷深度/cm		最大冲刷深度减小率/%	
			明流条件	冰盖条件	明流条件	冰盖条件
光墩			6.09	6.61		
水平护圈		5.0	4.98	5.81	18.2	12.1
		2.5	4.24	4.87	30.4	26.3
		0	3.06	3.49	49.8	47.2
钩环式护圈	45	5.0	4.53	5.37	25.6	18.8
		2.5	3.69	4.33	39.4	34.5
		0	2.42	2.83	60.3	57.2
	90	5.0	4.59	5.41	24.6	18.2
		2.5	3.78	4.41	37.9	33.3
		0	2.49	2.91	59.0	56.0
	135	5.0	4.48	5.33	26.4	19.4
		2.5	3.58	4.22	41.2	36.2
		0	2.30	2.70	62.2	59.1

表 2 为不同高度的钩环式护圈安装在沙床面时的最大冲刷深度及减小率,可以看出,当钩环式护圈的高度为 1 cm 时,在所设计的 3 个角度中,最大冲刷深度减小率均最大,且均大于水平护圈;随着钩环式护圈高度的增加,明流和冰盖条件下最大冲刷深度的变化规律相似,均逐渐增大,且其防护作用逐渐弱于水平护圈。因此,在设计的所有形状中,钩环式

表 2 不同高度的钩环式护圈最大冲刷深度及减小率

防冲措施	钩环角度/ (°)	钩环高度/cm	最大冲刷深度/cm		最大冲刷深度减小率/%	
			明流条件	冰盖条件	明流条件	冰盖条件
光墩			6.09	6.61		
水平护圈			3.06	3.49	49.8	47.2
钩环式护圈	45	1.0	2.42	2.83	60.3	57.2
		1.5	2.90	3.29	52.4	50.3
		2.0	3.23	3.78	46.9	42.8
	90	1.0	2.49	2.91	59.0	56.0
		1.5	2.76	3.37	54.7	48.9
		3.0	3.32	3.88	45.4	41.3
	135	1.0	2.30	2.70	62.2	59.1
		1.5	2.84	3.21	53.4	51.5
		3.0	3.18	3.73	47.8	43.5



护圈的高度为 1 cm 时,其防护效果最佳。

### 2.3 垂向时均流速

根据以上结果,试验分析钩环式护圈安装在沙床面且护圈的高度为 1 cm 的工况,并以光墩工况和水平护圈工况作为参照。为便于描述水力特性,将钩环角度为 45°、90°、135°的钩环式护圈工况命名为工况 1~3,水平护圈工况命名为工况 4,光墩工况命名为工况 5。

在桥墩局部冲刷防护的过程中,钩环式护圈主要起到阻挡下降水流,改变桥墩周围水流流态的作用。测线 3 位于桥墩中心,能突出反映安装钩环式护圈后,桥墩周围垂向流速的变化,测线 2 紧贴桥墩,能体现桥墩周围水流流态的变化。因此,下文分析断面 II 测线 3、顺水流方向各断面测线 2 的 0.1h 处点 A 的垂向时均流速。

采用声学多普勒流速仪对桥墩周围 1.5 ~ 10.5 cm 的水深范围进行流速测量,每个测点采集 10 000 个瞬时数据,取均值后得到测点的垂向时均流速值。

垂向时均流速采用底部剪切流速进行无量纲化,此处底部剪切流速  $u^*$  采用下式计算:

$$u^* = \sqrt{gRS} \quad (1)$$

式中: $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $R$  为水力半径,  $m$ ;  $S$  为底坡坡度。

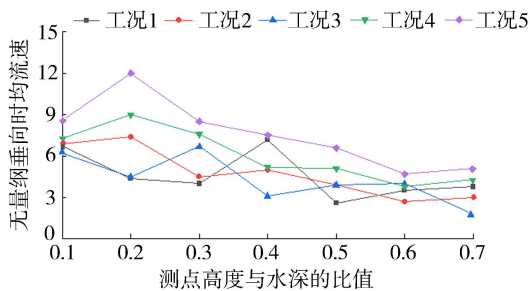
冰盖条件下,水力半径  $R$  采用 Tang 等<sup>[31]</sup> 提出的冰盖下水力半径计算公式:

$$R = \frac{hB}{2h + B(1 + a/100)} \quad (2)$$

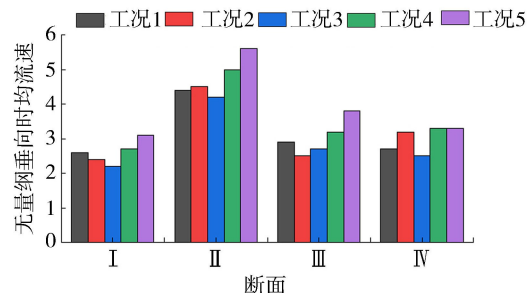
式中: $B$  为水槽宽度,  $m$ ;  $a$  为覆盖比率。

图 6 为冰盖条件下桥墩周围的垂向时均流速分布,由图可知,各工况断面上部垂向流速分布均匀,差异不大,护圈的存在改变了断面中下部的水流结构,使得各工况在断面中下部的垂向流速出现了较大差异,各工况在 0.2h ~ 0.4h 处出现最大值,原因是受冰盖影响,断面垂向流速最大值点下移,且更靠近粗糙的河床一侧。工况 5(即光墩)断面底部的垂向流速要明显大于其他工况,说明护圈对河床起到了一定的保护作用,减小了断面底部的垂向流速。装有钩环式护圈的工况在断面底部的垂向流速较工况 4(即水平护圈)更小,说明钩环的存在进一步减小了底部的垂向流速,且当钩环角度为 135°时减小程度最大。

5 种工况桥墩各断面测线 2 上测点 A 的垂向时均流速顺水流方向均不断变化,安装护圈后,各测点的垂向时均流速整体减小。断面 I 测点与底部漩涡系统有一定距离,受其影响较小,水流平稳,垂向流



(a) 断面 II 测线 3

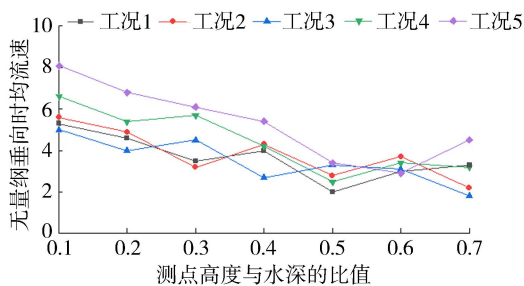


(b) 各断面测线 2 测点 A

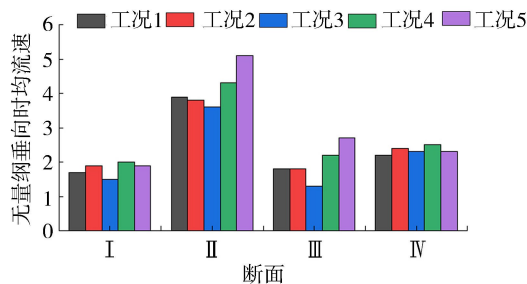
图 6 冰盖条件下桥墩周围垂向时均流速

速较小;断面 II 测点位于墩前,受下降水流及底部马蹄形漩涡的影响,垂向流速均增大;断面 III 测点受墩侧黏滞作用的影响,此处水流主要横向发展,垂向流速明显减小;桥墩尾部水流结构复杂,墩尾测点受尾涡以及墩尾汇聚水流的综合影响,工况 5 在此处测点的流速值增大,工况 1~3 由于钩环式护圈偏转水流的作用,此处测点的流速值要明显小于工况 5。

图 7 为明流条件下桥墩周围的垂向时均流速分布,由图可知,墩前断面 II 测线 3,随着垂向流速的向下积累,断面下部的垂向流速要大于断面上部;装有水平护圈后,河床底部垂向流速减小,相比于工况 5,工况 4 底部垂向流速减小了 23.5%;安装钩环式



(a) 断面 II 测线 3



(b) 各断面测线 2 测点 A

图 7 明流条件下桥墩周围垂向时均流速

护圈后,底部垂向流速进一步减小,其中工况3底部垂向流速减小程度最大。5种工况桥墩各断面测线2上测点A的垂向时均流速分布与冰盖条件下相似,均在墩前断面Ⅱ较大,而在墩侧及墩后减小,且装有钩环式护圈的工况底部垂向流速要明显小于光墩和水平护圈工况。

由以上桥墩周围垂向流速分析可知,安装钩环式护圈后,桥墩周围底部的垂向流速整体减小,3种角度的钩环式护圈对床面的防护效果均优于水平护圈,其中135°钩环式护圈的效果最佳。

### 2.4 垂向紊动强度

由以上分析可知,工况3的冲坑深度减小最大;各工况垂向时均流速分析结果,也从理论上证明了135°钩环式护圈的防护效果更好;为进一步验证试验结果的可靠性,对工况3桥墩迎水面的垂向紊动强度进行分析,并以水平护圈工况作为对照。

紊动强度表示瞬时流速的波动强度,是水流紊动性能的一个基本参数。紊动强度常采用脉动流速的均方根来表示,即:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2} \quad (3)$$

式中: $\sigma_w$ 为垂向紊动强度,m/s; $w_i$ 为垂向时均流速,m/s; $\bar{w}$ 为垂向平均流速,m/s。

图8为工况3和工况4桥墩墩前断面Ⅱ垂向紊

动强度的分布情况,垂向紊动强度采用摩阻流速进行无量纲化。由图8可知,明流条件下,工况3和工况4墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布相似,测线3的垂向紊动强度要大于其他测线,且断面底部的垂向紊动强度要明显大于断面上部,原因是离桥墩越近,水流受到的扰动越大,相应紊动强度越大,断面底部存在复杂的漩涡系统,此处水流紊动剧烈,故紊动强度大;工况4断面中下部垂向紊动强度整体上要大于工况3,且断面两侧的垂向紊动强度要明显大于工况3。

冰盖条件下,工况4墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布大体上关于测线3对称,表层垂向紊动强度变化不大;底部由于水平护圈的保护作用,垂向紊动强度较小;中下部垂向紊动强度增大,且在0.2h~0.3h处出现最大值,原因是冰盖和护圈改变了水流流态,此处水流紊动剧烈。工况3墩前断面Ⅱ的垂向紊动强度分布与工况4相似,断面的上部垂向紊动强度较小,但工况3在断面中下部的垂向紊动强度更小,且测线1和5的垂向紊动强度要明显小于工况4,原因是下降水流被底部护圈阻挡后,无法迅速到达下游,其向外扩散与行进水流相遇,会造成局部水流紊动,而钩环起到了偏转水流的作用,减弱了桥墩周围水流的紊动,使得墩侧紊动强度降低,进一步说明钩环的存在优化了水平护圈的防护效果。

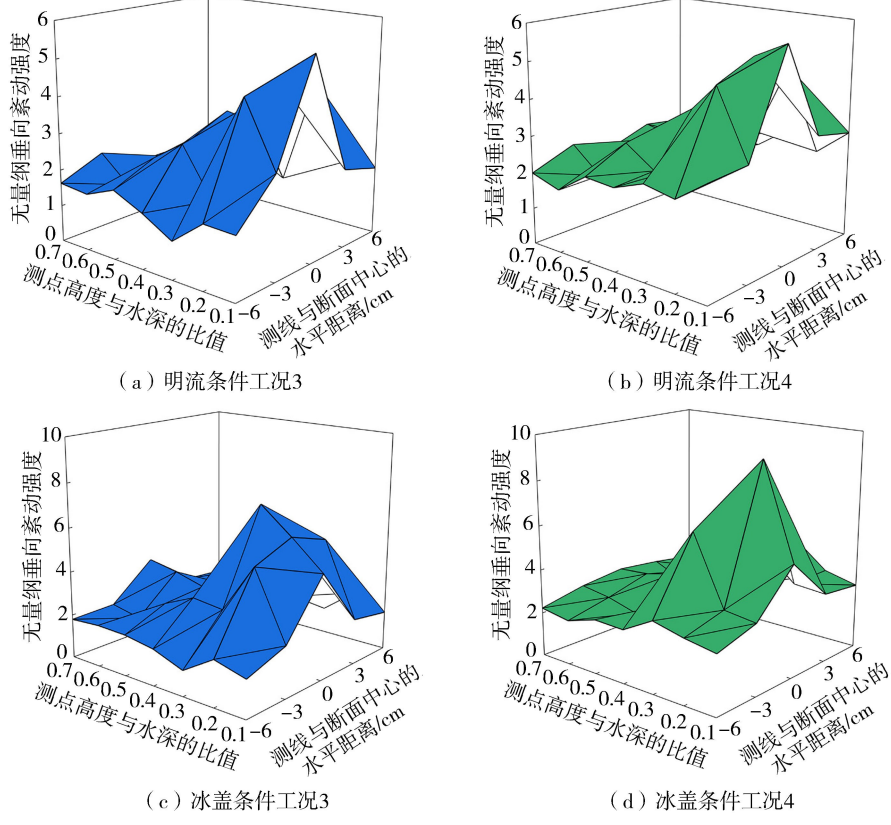


图8 断面Ⅱ垂向紊动强度

## 2.5 桥墩局部无量纲最大冲刷深度计算的多元回归分析

为了更好地了解钩环式护圈的形状因子及安装位置对桥墩周围局部最大冲刷深度的影响,进行了多元回归分析。装有钩环式护圈的桥墩局部无量纲最大冲刷深度可用以下公式计算:

$$\frac{d_s}{D} = K_0 \left(\frac{i}{D}\right)^a t^b \left(\frac{l}{D}\right)^c \quad (4)$$

式中: $d_s$ 为局部最大冲刷深度,cm; $K_0$ 为修正系数; $l$ 为底部护圈到自由水面的距离,cm。

通过多元回归分析,明流和冰盖条件下的经验方程分别为

$$\frac{d_s}{D} = 1.974 \left(\frac{i}{D}\right)^{0.214} t^{-0.064} \left(\frac{l}{D}\right)^{-1.290} \quad (5)$$

$$\frac{d_s}{D} = 2.105 \left(\frac{i}{D}\right)^{0.196} t^{-0.036} \left(\frac{l}{D}\right)^{-1.127} \quad (6)$$

根据经验公式,钩环式护圈的安装位置对局部最大冲刷深度的影响最大,且安装位置离床面越近,最大冲刷深度越小;钩环式护圈的高度对最大冲刷深度亦有一定影响,两者呈正相关关系,随着钩环式护圈高度的增加,最大冲刷深度逐渐增大;相比于前面两个因素,钩环式护圈的角度对最大冲刷深度的影响很小,这也是在安装位置和高度相同的情况下,角度不同带来的最大冲刷深度差异很小的原因。

图9为无量纲最大冲刷深度实测值与计算值对比,可见明流和冰盖条件下,经验公式的计算值和试验实测值的吻合度较好,式(5)和式(6)能很好地反映本试验数据中各个因素对无量纲最大冲刷深度的相应关系。

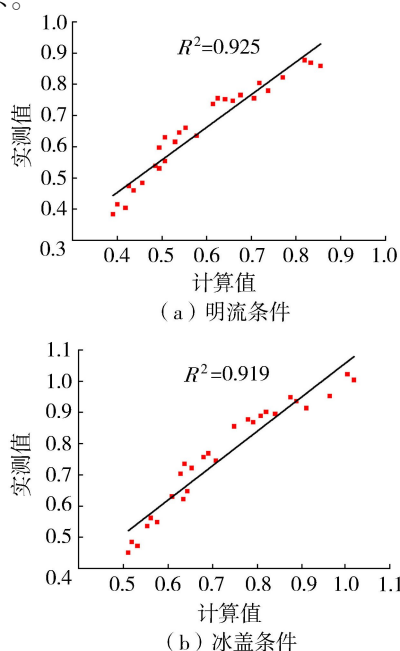


图9 无量纲最大冲刷深度实测值与经验公式计算值对比

对于该经验方程在实际水利工程中的应用,根据 Carey<sup>[32]</sup>的研究,冬季稳封期冰盖的下表面糙率可取0.0100~0.0281,且一般视为光滑冰盖。本试验中冰盖的糙率采用 Fu 等<sup>[33]</sup>的方法确定,为0.0191。因此,本研究提出的经验公式对明流和冰盖条件下水流均适用。

## 3 结论

a. 钩环式护圈安装在床面位置时,冲刷进程、墩后堆积物形态不同于其他位置及光墩;冲刷始于桥墩墩后,向墩侧、墩前发展,墩后堆积物更小、更细。与水平护圈相比,钩环式护圈的防护效果更好,高度为1cm的135°钩环式护圈安装在床面时的防护效果最好,较无防护工况,明流下最大冲刷深度可减小62.2%,冰盖下最大冲刷深度可减小59.1%。

b. 安装钩环式护圈后,桥墩周围床面的垂向流速、垂向紊动强度均减小,且均在断面中下部出现最大值;与水平护圈相比,装有钩环式护圈的桥墩墩侧垂向紊动强度减小,桥墩周围水流紊动更小。

c. 通过多元回归分析,建立了计算桥墩周围局部无量纲最大冲刷深度的经验方程,方程表明,钩环式护圈的安装位置和高度是桥墩周围最大冲刷深度的主要影响因素,钩环的角度对最大冲刷深度的影响较小,该式可用于计算明流和冰盖条件下水流的局部冲刷深度。

d. 装有钩环式护圈的桥墩局部最大冲刷深度受众多因素影响,如泥沙粒径、水流强度、冰盖糙率等。本文侧重于分析钩环式护圈的形状及安装位置对明流和冰盖(稳定)条件下桥墩局部冲刷的影响,关于河流流凌期、开河期粗糙冰盖(浮动)条件下桥墩局部冲刷的防护有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王军,苏奕全,侯智星,等.冰盖条件下桥墩局部冲刷研究进展[J].水利学报,2020,51(10):1248-1255. (WANG Jun, SU Yilei, HOU Zhixing, et al. Advances in research work regarding local scour around bridge piers/abutments under ice-covered flow condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1248-1255. (in Chinese))
- [2] 陈稳.河流冲刷对既有桥梁墩台承载力影响的研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [3] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(10): 1197-1214.
- [4] 杨开林.河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展[J].水利学报,2018,49(1):81-91. (YANG Kailin. Advances

- of ice hydraulics, ice regime observation and forecasting in rivers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49 (1):81-91. (in Chinese))
- [ 5 ] HAINS D B, ZABILANSKY L J. Scour under ice: potential contributing factor in the Schoharie creek bridge collapse [C] // *Proceedings of the 13th International Conference on Cold Regions Engineering*. Orono: ASCE, 2007.
- [ 6 ] VALELA C, SIRIANNI D A B, NISTOR I, et al. Bridge pier scour under ice cover [J]. *Water*, 2021, 13 (4): 536.
- [ 7 ] CHIEW Y M. Scour protection at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118 (9): 1260-1269.
- [ 8 ] 房世龙, 陈红, 王岗. 桥墩局部冲刷防护工程特性研究综述 [J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27 (4): 84-89. (FANG Shilong, CHEN Hong, WANG Gang. Properties of protection engineering against local scouring around piers [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27 (4): 84-89. (in Chinese))
- [ 9 ] TAFAROJNORUZ A, GAUDIO R, CALOMINO F. Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138 (3): 297-305.
- [ 10 ] KUMAR V. Reduction of scour around bridge pier using protective devices [D]. Roorkee: University of Roorkee, 1996.
- [ 11 ] WEI Kai, QIU Fang, QIN Shunquan. Experimental and numerical investigation into effect of skirted caisson on local scour around the large-scale bridge foundation [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 111052.
- [ 12 ] KAYATURK S Y, KOKPINAR M A, GOGUS M. Effect of collar on temporal development of scour around bridge abutments [C] // *2nd International Conference on Scour and Erosion*. Singapore: IAHR, 2004: 14-17.
- [ 13 ] WANG Shunyi, WEI Kai, SHEN Zhonghui, et al. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars [J]. *Water*, 2019, 11 (7): 1515.
- [ 14 ] 张万峰, 文恒, 牟献友, 等. 环翼式桥(闸)墩防冲刷实验研究 [J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32 (3): 226-229. (ZHANG Wanfeng, WEN Heng, MOU Xianyou, et al. Experimental research on scouring and protective of bridge pier (brake) wing-ring baffles [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2011, 32 (3): 226-229. (in Chinese))
- [ 15 ] 牟献友, 乔春林, 冀鸿兰, 等. 桥墩上环翼型防冲板和开缝组合新型防护试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36 (4): 26-37. (MOU Xianyou, QIAO Chunlin, JI Honglan, et al. Experimental study on anti-scour devices of slotted bridge piers with a semicircular fin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36 (4): 26-37. (in Chinese))
- [ 16 ] CHEN S C, TFWALA S, WU T Y, et al. A hooked-collar for bridge piers protection: flow fields and scour [J]. *Water*, 2018, 10 (9): 1251.
- [ 17 ] SAADATI S M R S, HEYDARI M M, SANEIE M. Experimental investigation of ridged collar effect on scour process on the periphery of circular pier in clear water condition [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2016, 25 (11): 4525-4536.
- [ 18 ] CHANG Wenyi, LAI J S, YEN C L. Evolution of scour depth at circular bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130 (9): 905-913.
- [ 19 ] WU Peng, HIRSHFIELD F, SUI Jueyi, et al. Impacts of ice cover on local scour around semi-circular bridge abutment [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26 (1): 10-18.
- [ 20 ] MIA F, NAGO H. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129 (6): 420-427.
- [ 21 ] 曹祖德, 杨树森, 杨华. 粉沙质海岸的界定及其泥沙运动特点 [J]. *水运工程*, 2009 (1): 108-111. (CAO Zude, YANG Shusen, YANG Hua. Definition of silt-sandy beach and its characteristics of sediment movement [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009 (1): 108-111. (in Chinese))
- [ 22 ] ETTEMA R. Scour at bridge piers [D]. Auckland: University of Auckland, 1980.
- [ 23 ] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S. Local scour around bridge piers [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1969, 95 (6): 1919-1941.
- [ 24 ] 成兰艳, 郝拉柱, 牟献友, 等. 环翼式桥墩环翼式挡板最佳延伸长度试验 [J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33 (2): 32-36. (CHENG Lanyan, HAO Lazhu, MOU Xianyou, et al. Experimental research on optimal development lengths of ring-wing baffle of ring-wing pier [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33 (2): 32-36. (in Chinese))
- [ 25 ] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125 (1): 59-65.
- [ 26 ] 黄君宝, 肖厅厅, 孙志林, 等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (5): 441-446. (HUANG Junbao, XIAO Tingting, SUN Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49 (5): 441-446. (in Chinese))
- [ 27 ] 王顺意, 牟力, 魏凯, 等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40 (3): 425-431. (WANG Shunyi, MOU Li, WEI Kai, et al. Experimental study on local scour of cylindrical pier under different hydraulic conditions [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40 (3): 425-431. (in Chinese))

(下转第 26 页)

# 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟

曾 诚<sup>1</sup>, 尹雨然<sup>1</sup>, 陈 辰<sup>1</sup>, 周 婕<sup>2</sup>, 邱 斐<sup>1</sup>, 白一墨<sup>1</sup>, 王玲玲<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**为研究不同宽深比和径宽比对明渠弯道交汇口水动力特性的影响规律,利用体积函数法(VOF)追踪自由表面,采用RNG  $k-\varepsilon$ 模型封闭控制方程,建立明渠弯道交汇水流三维数值模型对3种宽深比和3种径宽比的5种组合工况进行了模拟,分析了交汇口附近的水面形态、流速分布、断面环流和分离区形态等特征。结果表明:随着宽深比的增大或径宽比的减小,交汇口附近水面跌落程度减弱;与径宽比相比,宽深比对弯道交汇口以及下游区域内流速分布的不均匀性影响较大,宽深比增大,纵向流速变幅增大,流速分布更加不均匀,水流偏转效应增强;宽深比或径宽比减小导致弯道处环流强度增大;宽深比或径宽比增大,弯道处回流结构增强,分离区尺寸增大,水平方向上形态更加狭长。

**关键词:**明渠弯道水流;支流入汇;宽深比;径宽比;数值模拟

中图分类号:TV131.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0009-07

**Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow**//ZENG Cheng<sup>1</sup>, YIN Yuran<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, QIU Fei<sup>1</sup>, BAI Yimo<sup>1</sup>, WANG Lingling<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to study the impacts of different width-depth ratios and radius-width ratios on the hydrodynamic characteristics at open-channel confluences with bend flow, a three-dimensional numerical model was established by using the volume of fluid (VOF) method for the free surface capture and adopting the RNG  $k-\varepsilon$  model for the governing equations closure. The water surface pattern, velocity distribution, secondary flow and shape of separation zone were analyzed after the simulations of five combined cases with three width-depth ratios and three radius-width ratios. The results indicate that the degree of water level drop near the intersection decreases with the increase of the width-depth ratio or the decrease of the radius-width ratio. Compared to the radius-width ratio, the width-depth ratio has a stronger impact on the non-uniformity of velocity distribution at the confluence and the downstream area. When the width-depth ratio increases, the longitudinal flow rate increases and the non-uniformity of velocity distribution increases with enhanced flow deflection effect. When the width-depth ratio or radius-width ratio increases, the reflux structure at the bend is enhanced, the size of the separation zone increases with narrower and longer horizontal form.

**Key words:** open-channel bend flow; tributary flow; width-depth ratio; radius-width ratio; numerical simulation

天然弯曲河道存在大量交汇口,交汇口附近水流运动特性发生改变,呈现特有的水力特性。对于顺直明渠交汇水流的已有研究表明,明渠交汇口处水流结构复杂。水面形态方面,Taylor<sup>[1]</sup>选用矩形断面、平底支槽非对称入汇主槽的方式,保持水流为缓流,采用45°和135°交汇角,研究水面形态的变化;兰波等<sup>[2]</sup>对30°、60°和90°的3种交汇角和15种流量比的交汇水流进行水槽试验分析,得到了水面形

态与交汇角、流量比的定性关系,结果表明:随着交汇角增大,水流紊动增强;刘盛赞等<sup>[3]</sup>建立了适用于水流交汇区的数值模型,指出交汇角、流量比和动量比越小,交汇口上游水位壅高及分离区内水位的下降程度越不明显;周舟等<sup>[4]</sup>建立了明渠交汇流数值模型,指出同一流量比工况下,交汇角增大,交汇口附近水面变幅增大,同一角度工况下,流量比增大,交汇口附近水面变幅减小。速度分布方面,

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3202605);中央高校基本科研业务费专项(B200202116, B200204044)

作者简介:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: czeng@hhu.edu.cn

通信作者:周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail: zhoujie@hhu.edu.cn

Biron 等<sup>[5]</sup>指出干支流床面高程差是改变交汇口水流结构的重要因素;王协康等<sup>[6]</sup>通过水槽试验研究了交汇角为 30°的顺直明渠交汇水流三维结构,结果表明交汇口上游受支流顶托影响产生壅水并且出现低流速区,在交汇口对岸产生高流速区,水流高速带分布于交汇口附近并形成断面环流;魏文礼等<sup>[7]</sup>选取 30°、45°、60°和 90°交汇角,对顺直交汇流交汇区下游各断面的流速不均匀系数分布进行定量分析,发现随着交汇角增大,流速分布越不均匀。断面环流方面,Weber 等<sup>[8]</sup>通过物理试验研究发现环流强度沿顺水流方向逐渐衰减;Luo 等<sup>[9]</sup>发现明渠弯道不同位置处断面环流结构不同,在某些断面上环流的数量与方向发生变化;Yuan 等<sup>[10]</sup>通过试验研究发现交汇口附近的断面环流会对床面造成剪切而形成冲刷坑;Yuan 等<sup>[11]</sup>研究发现河流平面形状和流量比影响断面环流,而断面环流反过来又影响沉积物的输运以及当地河床的形态;曾诚等<sup>[12]</sup>建立了等宽顺直明渠交汇水流三维数值模型,模拟结果表明,收缩区水流横断面可以观察到明显的环流结构,水流恢复区断面出现不同的环流结构,交汇口下游断面环流强度沿顺水流方向逐渐减弱。

前人针对顺直明渠交汇水流的研究较为充分,但对于弯道交汇水流的研究相对较少。张强等<sup>[13]</sup>对长江沿线的观测结果表明,支流入汇段大部分属于顺直河道,而干流在交汇段呈现出弯曲特性,因此对于交汇弯道的研究具有重要意义。Roberts<sup>[14]</sup>对天然交汇弯道进行观测后发现,支流倾向于在弯道最大曲率点弯顶附近凹岸处入汇,并进一步分析了流量比对明渠弯道回流区的影响。张为等<sup>[15]</sup>针对微弯交汇水流运动特性,建立了曲线坐标下的二维水沙模型,并将该模型计算结果与长江上游涪陵河段实测数据进行对比,认为该模型能够反映微弯交汇水流的运动规律。付中敏等<sup>[16-18]</sup>基于中心角 180°、径宽比 2 的交汇弯道进行了水槽试验和数值模拟研究,分析了交汇角和流量比对交汇弯道水流的影响。目前针对弯道交汇的研究限制于特定弯道,集中讨论交汇角、流量比等不同入汇条件对交汇水流的影响,而对不同弯道几何形态下交汇流的讨论较少。本文对不同弯道几何形态的明渠弯道交汇流工况进行数值模拟计算,分析支流入汇条件下水深比和径宽比对水动力特性的影响。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

明渠弯道交汇水流的模拟应满足的质量守恒及动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

式中: $x_i, x_j$ 为  $x, y, z$  轴坐标( $i, j=1, 2, 3$ ); $u_i, u_j$ 分别为  $i, j$  方向的时均流速; $t$  为时间; $\rho$  为流体密度; $g$  为重力加速度; $p$  为压强; $\mu$  为动力黏性系数; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力。

采用体积函数(volume of fluid, VOF)法捕捉自由液面。网格单元的体积为  $V_C$ , 水的体积为  $V_W$ , 则水的体积分数  $a_w$  为

$$a_w = \frac{V_W}{V_C} \quad (3)$$

$a_w = 1$  表示网格单元内全部为水,  $a_w = 0$  表示网格单元内全部为空气,  $0 < a_w < 1$  表示该网格单元存在自由水面。 $a_w$  满足输运方程:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(a_w u_i) = 0 \quad (4)$$

通过迭代求解,可根据下式确定网格单元内其他特性参数  $\psi$ , 如密度、黏性系数等:

$$\psi = a_w \psi_w + (1 - a_w) \psi_A \quad (5)$$

式中:下标 W 表示水;A 表示空气。

本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型封闭控制方程模拟水流,  $k$  方程和  $\varepsilon$  方程分别为

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad P_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: $k$  为紊动能; $\varepsilon$  为紊流耗散率; $P_k$  为紊动能生成项;参数  $\eta_0, \beta, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  的取值分别为 4.377、0.012、0.085、0.7179 和 0.7179。RNG  $k-\varepsilon$  模型考虑了非平衡应变率影响的附加耗散生成项,反映在  $\varepsilon$  方程中  $C_{1\varepsilon}$  不是常数,而其他常数值均由理论计算所得,并非经验常数。

速度与压力解耦采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法,其他项离

散采用 QUICK (quadratic upstream interpolation for convective kinematics) 格式。入口边界分为水相和气相,水相为速度进口,气相为压力进口;出口边界为压力出口,满足静压假定,出口水位与水槽试验值一致,出口压力满足静水压强分布;进出口的紊动能与耗散率边界值均按照经验公式的计算结果初始化;壁面为固壁边界。

### 1.2 网格划分及模型验证

本文选取 Sui 等<sup>[17]</sup>的明渠弯道交汇水流试验为基础开展数值模拟研究。试验三维模型如图 1(a)所示,模型高度为 0.45 m,坐标原点位于弯道底面圆心处。模型具体尺寸如图 1(b)所示,中心角  $\varphi$  为  $180^\circ$ 的弯道主槽和顺直支槽水流交汇,弯道

上下游直段长均为 4 m,弯道内径为 1.5 m,中心线半径  $R_c=2$  m,外径为 2.5 m,主槽弯道宽 1 m。顺直支槽长 3.5 m,宽 0.3 m。支槽与弯道在凹岸弯顶  $\varphi=90^\circ$ 处相交。试验中弯段和主槽由有机玻璃组成。数值模拟参数依据物理模型试验,弯道进口流量为  $0.03\text{ m}^3/\text{s}$ ,支槽进口流量为  $0.018\text{ m}^3/\text{s}$ ,弯道出口水深为 0.18 m。

如图 2 所示,采用六面体结构化网格对计算区域进行剖分,在壁面附近和交汇口附近进行网格加密,网格数为  $360 \times 68 \times 24$ 。

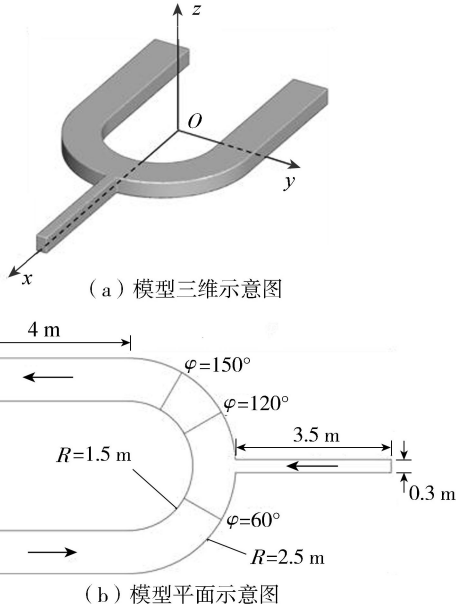


图 1 交汇弯道模型示意图

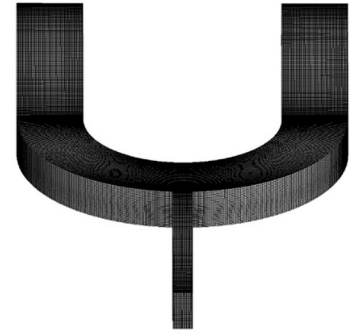


图 2 三维网格示意图

图 3 为  $\varphi=60^\circ$ 和  $\varphi=120^\circ$ 时断面纵向流速验证结果,其中,  $H$  为水深,  $B^*$  为无量纲径向距离,  $B^*=0$  表示凹岸边壁,  $B^*=1$  表示凸岸边壁。由图 3 可以看出断面速度分布计算结果与试验值吻合较好。在  $\varphi=60^\circ$ 断面,纵向流速在同一垂线位置分布较为均匀;在  $\varphi=120^\circ$ 断面,随着垂线位置靠近凹岸,纵向流速逐渐减小,甚至在凹岸边壁附近出现负值。凹岸侧,  $\varphi=60^\circ$ 断面纵向流速略大于  $\varphi=120^\circ$ 断面,凸岸侧情况则相反。

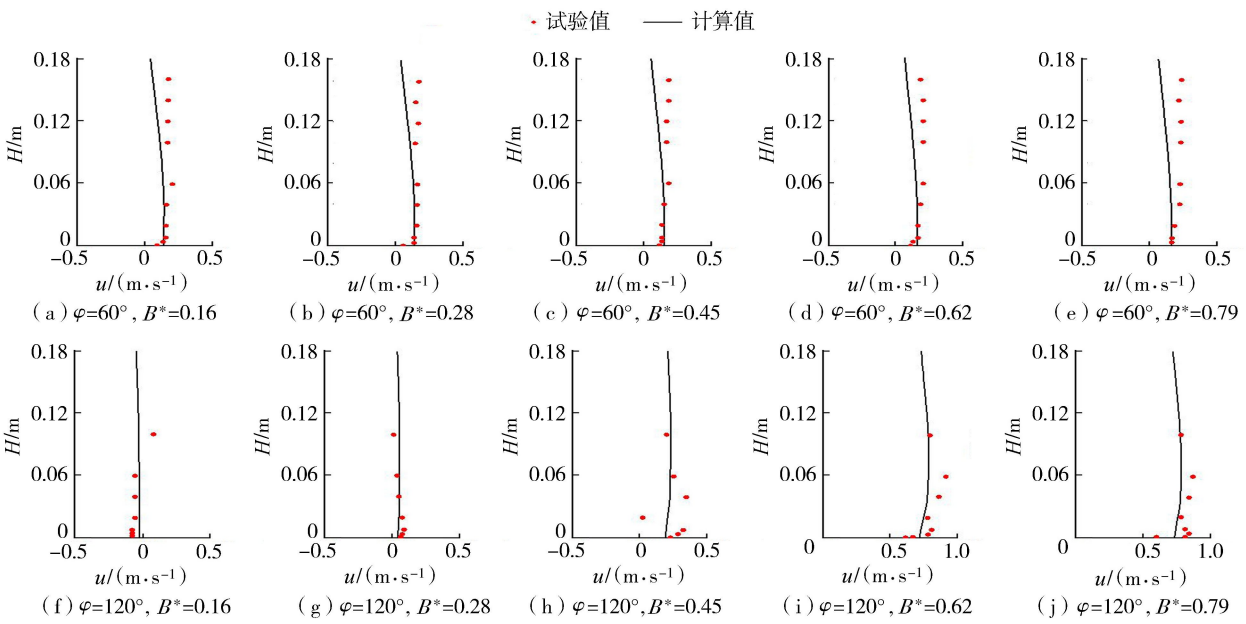


图 3 交汇区测点流速剖面对比

## 2 模拟结果分析

### 2.1 数值模拟工况

在交汇弯道水流模型验证基础上,针对3组宽深比( $H_r = 1.5, 3.0, 5.0$ )和3组径宽比( $R_r = 1.0, 1.5, 2.0$ )工况进行三维数值模拟研究,不同宽深比和径宽比的计算工况参数如表1所示。不同宽深比工况中,仅调整进口水深 $H_0$ 和出口水深 $H_1$ ;不同径宽比工况中,仅调整弯道曲率半径 $R_c$ 。计算工况网格均采用六面体结构化网格,不同工况网格数量在54万~65万之间。不同工况的入汇位置均在弯顶凹岸侧,交汇角均为 $90^\circ$ ,干支流流量比均为0.6,仅讨论宽深比和径宽比对交汇弯道水流的影响。

表1 交汇弯道计算工况参数

工况	$H_r$	$R_r$	$H_0/m$	$H_1/m$	$R_c/m$	$Re$	$Fr$
1	1.5	2.0	0.67	0.603	2.0	12693	0.017
2	3.0	2.0	0.33	0.297	2.0	17893	0.051
3	5.0	2.0	0.20	0.180	2.0	21216	0.107
4	5.0	1.5	0.20	0.180	1.5	21216	0.107
5	5.0	1.0	0.20	0.180	1.0	21216	0.107

### 2.2 水面形态

交汇对弯道自由水面形态分布产生影响,宽深比为5、径宽比为2条件下的交汇弯道水流沿程水位分布情况如图4所示(纵坐标 $Z^* = H/H_0$ )。

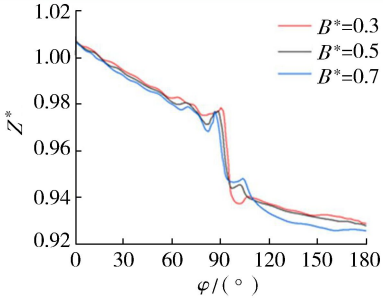


图4 交汇对弯道自由水面的影响

由图4可以看出,受支流入汇顶托作用影响,交汇口( $\varphi = 90^\circ$ )处水面发生跌落。跌落开始前短距离内沿程水位存在一先下降后上升的过程,且越靠近凸岸,这一过程越明显;水面上升到峰值后在汇流区急剧跌落,越靠近凹岸,跌落幅度越大;水面跌落到谷值后出现微小抬升;之后水位回落,越靠近凸

岸,回落速度越快。为进一步分析宽深比和径宽比对交汇弯道交汇口附近水面形态的影响,对于不同条件下水深比 $h'$ 进行计算, $h'$ 定义如下:

$$h' = \frac{h_{\max}}{h_{\min}} \quad (8)$$

式中 $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ 分别为 $B^* = 0.3$ 处沿程水面线跌落开始和结束位置水位。 $h'$ 反映了宽深比和径宽比对弯道交汇口区域水位变幅的影响。

表2为不同宽深比和径宽比条件下水深比 $h'$ 计算结果,可以看出,径宽比一定时, $h'$ 随着宽深比减小而逐渐增大;宽深比保持不变时, $h'$ 随着径宽比减小而减小。这意味着,随着宽深比减小或径宽比增大,支流入汇对交汇口上游弯道水流挤压作用加强,上游水位壅高,水位跌落的落差增大,交汇口附近水面线变动明显,水体与弯道边壁的能量交换表现得更为剧烈。

表2 水深比计算结果

$H_r$	$R_r$	$h'$	$H_r$	$R_r$	$h'$
1.5	2.0	1.0822	5.0	1.5	1.0437
3.0	2.0	1.0520	5.0	1.0	1.0371
5.0	2.0	1.0444			

### 2.3 流速分布

为方便不同计算工况结果对比,以进口流速 $u_0$ 对纵向流速 $u$ 、横向流速 $v$ 、垂向流速 $w$ 进行无量纲化, $U^* = u/u_0$ , $V^* = v/u_0$ , $W^* = w/u_0$ 。图5给出了宽深比为5、径宽比为2时 $Z^* = 0.3$ (下层)、 $Z^* = 0.5$ (中层)和 $Z^* = 0.7$ (上层)的纵向流速 $U^*$ 分布情况。图中可以看到,在垂向上,水流纵向流速分布规律较为一致。交汇口下游弯道纵向流速分布相较于交汇口上游发生了明显变化,交汇口处水流发生偏转。交汇口下游出现明显的水流分区现象,交汇口下游凹岸边壁附近水体回流,弯道过水断面被束窄,随水流继续行进,弯道纵向流速逐渐减小。

为进一步分析宽深比和径宽比对交汇弯道流速分布的影响,选取3组工况 $Z^* = 0.5$ 处纵向流速计算结果进行对比,如图6所示,不同宽深比和径宽比下流速分布规律较为一致。相较于径宽比,宽深比对流速分布的影响更为明显,具体表现为:不同宽深

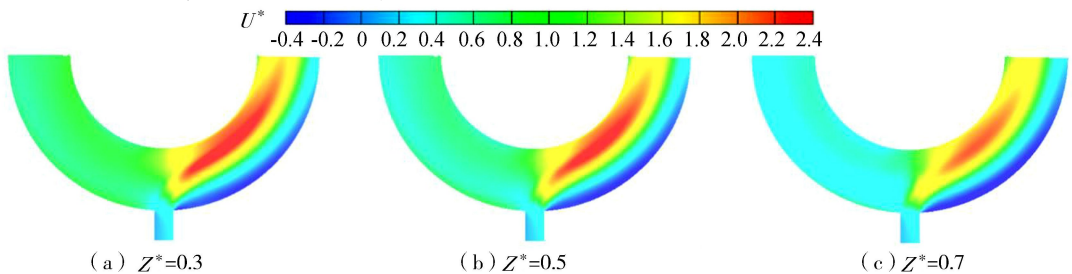


图5 下层、中层和上层纵向流速分布



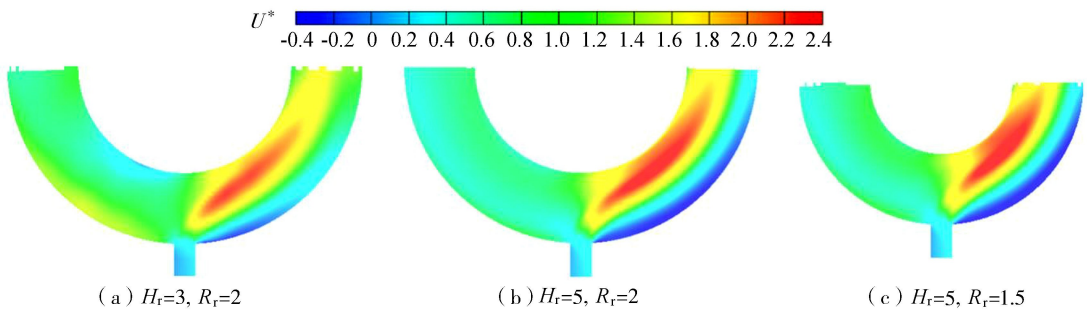


图6 不同工况下纵向流速分布

比工况的交汇口下游不同分区范围大小变化明显；随着宽深比减小，弯道水流偏转效应减弱，流速在横向上变化梯度减小。交汇口下游回流减弱，分离区范围减小，分离区和收缩区长度变短。

图7是不同条件下交汇口下游 $\varphi = 120^\circ$ 断面流速分布，可以看出，宽深比对交汇弯道分离区尺寸影响明显，宽深比减小时，断面左侧凹岸处回流区减小，收缩面积随之增大。相比于宽深比，径宽比的改变对流速分布影响较为微弱。

综上所述，宽深比和径宽比对于弯道交汇口附近以及下游水域流速分布存在影响，其中宽深比的影响较为明显。随着宽深比减小，纵向流速在纵向

和横向上变化梯度降低，纵向流速变幅减小，流速分布更加均匀，水流偏转效应减弱。当宽深比减小，弯道回流结构减弱，交汇口下游分离区范围减小，收缩断面增大。分离区水平尺寸减小且沿水深方向变化梯度略有增大。

## 2.4 断面环流

图8是不同工况下交汇口上游 $\varphi = 60^\circ$ 断面、交汇口下游 $\varphi = 120^\circ$ 断面和 $\varphi = 150^\circ$ 断面 $V^* - W^*$ 的速度矢量图。

受汇流影响，交汇口下游断面环流结构较上游断面发生显著变化：断面凸岸收缩区域内可以观察到环流现象，凹岸分离区横向和垂向流速较小，在分

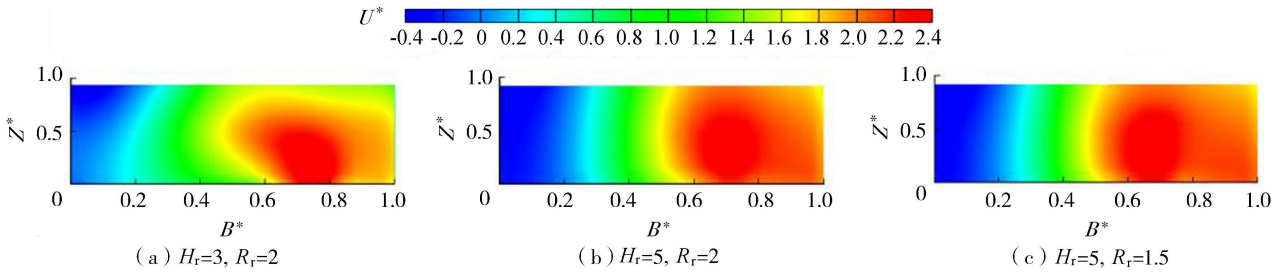


图7 不同工况下 $\varphi = 120^\circ$ 断面流速分布

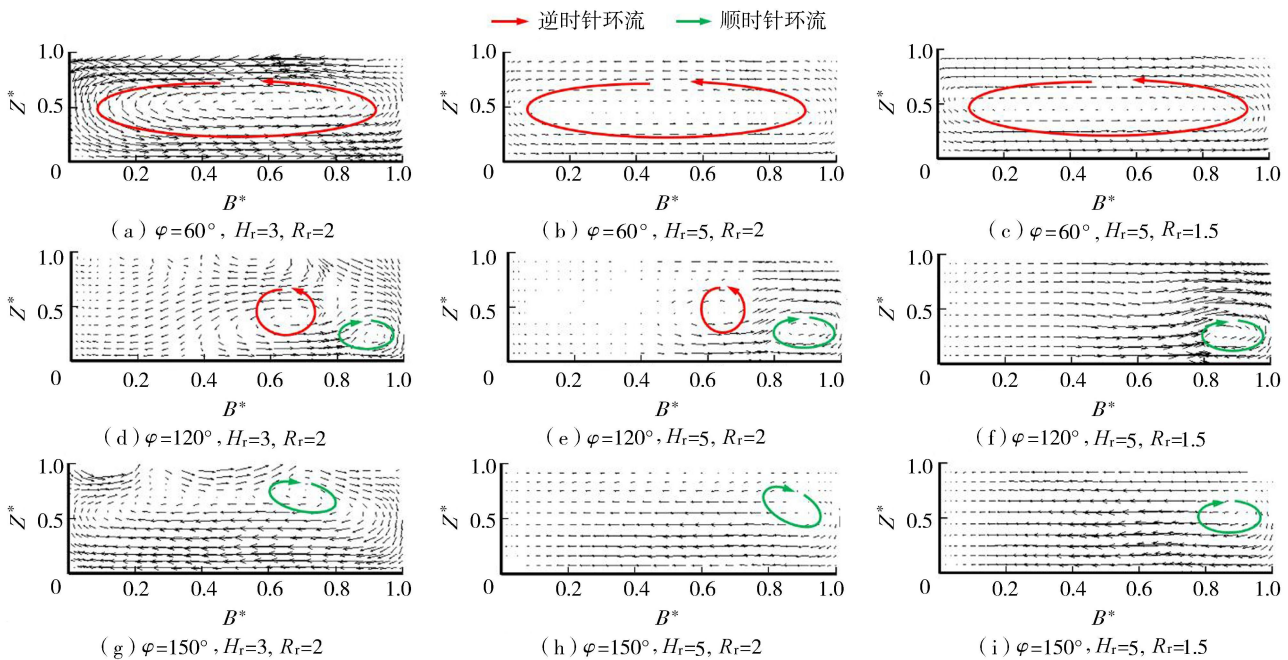


图8 不同工况下断面环流

离区几乎看不到横断面环流现象。由图 8(a) ~ (c) 可以看出, 交汇口上游断面存在明显的逆时针环流现象, 上层水体流向凹岸, 下层水体流向凸岸。当宽深比或径宽比减小, 交汇口上游断面环流结构显著加强。由图 8(d) ~ (f) 可以看出, 径宽比为 2 时,  $\varphi = 120^\circ$  断面凸岸收缩区可以观察到两个方向相反的环流, 径宽比为 1.5 时, 仅能看到凸岸侧上部一个顺时针环流。

为量化环流强度, 本文依据 Shukry<sup>[19]</sup> 提出的环流强度计算公式来分析弯道环流强度变化规律:

$$S_{xy} = \frac{V_{xy}^2}{V^2} \quad (9)$$

其中  $V_{xy} = \sqrt{v^2 + w^2}$   $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$

式中  $S_{xy}$  为环流强度。

图 9 为断面平均环流强度  $\bar{S}_{xy}$  沿程分布计算结果, 可以看出, 同一断面处断面环流强度随宽深比或径宽比减小而增大。交汇口上游, 环流强度逐渐增强; 交汇断面 ( $\varphi = 90^\circ$ ) 由于支流入汇, 水流紊动特性加强, 断面环流强度达最大值, 与前人的观测结果一致<sup>[20]</sup>。交汇口下游断面各工况环流强度差别较小。当  $\varphi$  由  $90^\circ$  增大至  $120^\circ$  时, 环流强度锐减, 随后环流强度略有回升, 当  $\varphi$  由  $150^\circ$  增大至  $180^\circ$  时, 环流强度减小。

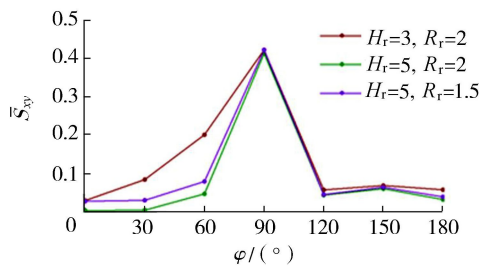


图 9 断面平均环流强度沿程分布

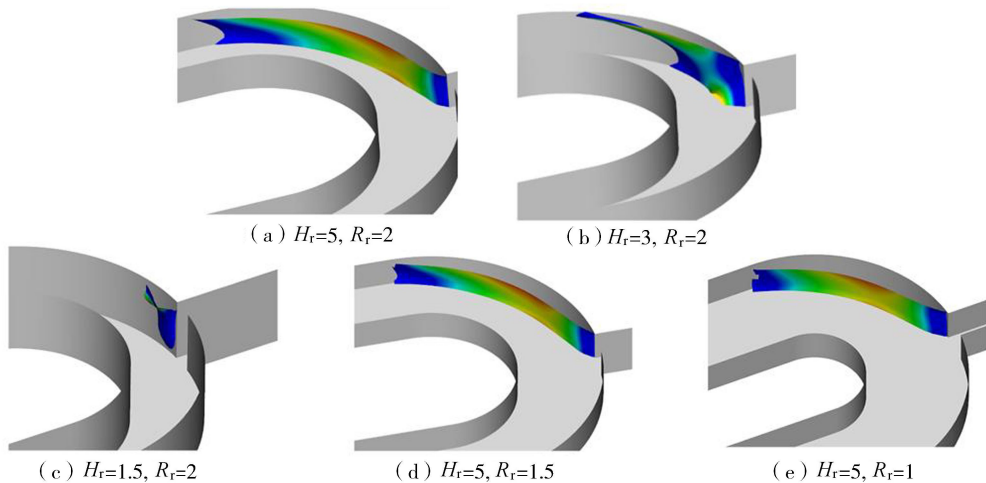
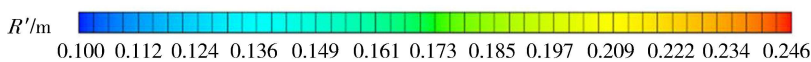


图 11 不同工况下分离区形态

## 2.5 分离区形态

分离区形态的界定方式通常有流线法和等值线法。流线法在定义分离区二维平面时较为适用, 而等值线法对于二维和三维分离区界定均能很好适用, 所以本文研究中采用等值线法定义分离区。

图 10 为  $H_r=5, R_r=2$  时分离区三维示意图。由图 10 可见, 弯道交汇分离区紧贴交汇口下游凹岸边壁, 呈现上大下小的形态, 垂向上平面形态相似, 与前人的观测结果一致<sup>[20]</sup>。以弯道圆心为原点, 弯道直段河宽方向为  $x$  方向, 支渠顺水流方向为  $y$  方向, 水深方向为  $z$  方向建立坐标系。为便于对比分析, 以弯道凹岸半径  $R$  对  $x$  和  $y$  进行无量纲化,  $X^* = x/R$ ,  $Y^* = y/R$ 。定义  $R'$  为分离区与弯道凹岸边壁的距离。

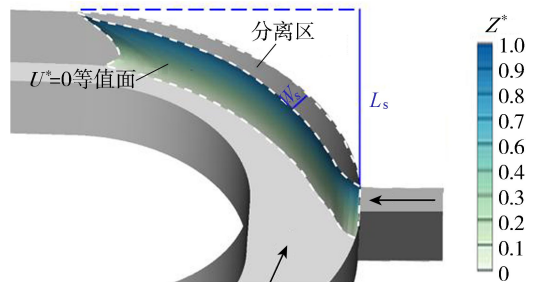


图 10 弯道交汇分离区三维示意图

图 11(a) 为  $H_r=5, R_r=2$  时分离区形态图, 可见分离区水平尺寸随着水深增大而呈减小趋势, 因此本文将分离区表层水平尺寸和垂向深度作为其几何特征参数。定义分离区长度  $L_s$  为表层在  $X^*$  轴的投影长度; 宽度  $W_s$  为表层与弯道凹岸边壁最大距离, 即分离区边界表层  $R'$  最大值; 高度  $H_s$  为分离区在  $Z^*$  轴上投影高度。因此根据分离区计算结果, 当  $H_r=5, R_r=2$  时, 分离区的长度  $L_s=0.94$ , 宽度  $W_s=0.235$ , 高度  $H_s=0.9$ 。

图 11(b) 和图 11(c) 分别为  $H_r=3, R_r=2$  和

$H_r=1.5, R_r=2$  时分离区形态图,可见当径宽比  $R_r$  一定时,随着宽深比减小,分离区长度  $L_s$  和高度  $H_s$  随之减小,特别是宽深比由 3 减小至 1.5 时分离区长度变化尤为明显,然而宽度  $W_s$  随着宽深比减小呈增大趋势。分离区竖直方向尺寸变化幅度增大,当宽深比减小为 1.5 时,近底面分离区消失。

图 11(d) 和图 11(e) 分别为  $H_r=5, R_r=1.5$  和  $H_r=5, R_r=1$  时分离区形态图,当宽深比  $H_r$  一定时,随着径宽比减小,分离区长度  $L_s$ 、宽度  $W_s$  和高度  $H_s$  变化缓慢,呈现非常微弱的减小趋势。

表 3 为不同工况下分离区  $L_s$ 、 $W_s$  和  $H_s$  的计算结果。由表 3 可见,分离区长度  $L_s$  受宽深比和径宽比的影响较大,尤其是宽深比;分离区宽度随宽深比的变化趋势与分离区长度相反;不同工况分离区高度  $H_s$  几乎没有差别,除了宽深比为 1.5 时,近底面分离区消失,分离区高度相应减小。

表 3 不同工况下  $L_s$ 、 $W_s$  和  $H_s$  的计算结果

$H_r$	$R_r$	$L_s$	$W_s$	$H_s$
1.5	2.0	0.252	0.245 8	0.85
3.0	2.0	0.845	0.238 3	0.90
5.0	2.0	0.940	0.235 0	0.90
5.0	1.5	0.925	0.235 3	0.90
5.0	1.0	0.883	0.232 8	0.90

在本文模拟的工况中,宽深比对于分离区的影响明显强于径宽比,当宽深比或径宽比较小时,分离区尺寸随宽深比或径宽比变化幅度增大。当宽深比或径宽比增大,分离区尺寸增大,水平尺寸更加狭长,高度也随之增加。即交汇弯道在较大的宽深比和径宽比中出现更强的回流结构,能够在宽深比或径宽比变动较小时,保证水平方向环流结构形态,而随着宽深比和径宽比的变小,尤其是宽深比,回流结构减弱,分离区受宽深比和径宽比的影响增强。

### 3 结论

a. 弯道交汇口附近水面发生跌落,越靠近凹岸交汇口,跌落现象越明显。随着宽深比的增大或者径宽比的减小,交汇口附近水面跌落程度减弱。

b. 交汇口水流发生偏转,交汇口附近水体回流,过水断面被束窄,流速增大,随水流继续行进,弯道流速逐渐减小。相较于径宽比,宽深比对流速分布的不均匀性影响较大。当宽深比增大,纵向流速变幅增大,流速分布更加不均匀,水流偏转效应增强。

c. 环流主要分布在水流收缩区,随着水流不断发展,交汇口下游断面环流强度逐渐减弱。宽深比或径宽比减小均导致弯道处环流强度增大。

d. 弯道交汇分离区水平尺寸呈现上大下小的变化趋势。宽深比和径宽比对交汇弯道分离区有一

定影响作用,随着宽深比或径宽比减小,这种影响作用加强。当宽深比或径宽比增大,回流结构加强,分离区尺寸增大,水平形态更加狭长。

### 参考文献:

[1] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 893-902.

[2] 兰波,汪勇. 干支流交汇水面形态特征分析[J]. 重庆交通大学学报, 1997, 16(4): 109-114. (LAN Bo, WANG Yong. Experimental study on water surface characteristics at the junction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1997, 16(4): 109-114. (in Chinese))

[3] 刘盛赉,康鹏,李然,等. 水流交汇区的水动力学特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 14-18. (LIU Shengyun, KANG Peng, LI Ran, et al. A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 14-18. (in Chinese))

[4] 周舟,曾诚,周婕,等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 347-353. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 347-353. (in Chinese))

[5] BIRON P, BEST J L, ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 676-682.

[6] 王协康,王宪业,卢伟真,等. 明渠水流交汇区流动特征试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(2): 1-5. (WANG Xiekang, WANG Xianye, LU Weizhen, et al. Experimental study on flow structure at open channel confluences [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(2): 1-5. (in Chinese))

[7] 魏文礼,邵世鹏,刘玉玲. 不同交汇角度明渠交汇口三维水力特性的大涡模拟研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(1): 57-63. (WEI Wenli, SHAO Shipeng, LIU Yuling. Three-dimensional numerical study of hydraulic characteristics at open-channel junctions with different intersection angles by Large Eddy Simulation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(1): 57-63. (in Chinese))

[8] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 340-350.

[9] LUO Hao, FYTANIDIS D K, SCHMIDT A R, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses [J]. Advances in Water Resources, 2018, 117: 120-139.

(下转第 38 页)

# 连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟

陆圣杰<sup>1</sup>, 朱海<sup>1</sup>, 徐洁如<sup>1</sup>, 王玲玲<sup>1</sup>, 华祖林<sup>2</sup>, 武显扬<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098;  
3. 南京林业大学风景园林学院, 江苏南京 210037)

**摘要:**为研究连续弯道水流中污染物的输运过程,参考连续弯道水流标量示踪试验,构建了水动力-污染物耦合三维大涡模拟数值模型,分析了点源污染物不同横向和垂向释放位置对下游河道污染物浓度分布特性的影响。结果表明:连续弯道内的纵向流速、涡量与紊动能大小存在关联且二次环流对污染物的输运及混合起主导作用;点源在连续弯道进口的横向和垂向布设位置将显著影响污染物的混合速率和空间分布范围;当点源在横向上布置于弯道进口中心和中心偏凸岸处,或在垂向上布置于弯道进口底床或水深中间处,下游污染物的混合速率最大,且影响范围更广;近场的污染物混合速率和影响范围呈正相关关系;连续弯曲河道中,点源位置的差异对污染物混合的影响主要体现在单个周期的弯道内。

**关键词:**连续弯道水流;点源污染物;输运特性;混合规律;大涡模拟

**中图分类号:**TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0016-11

**Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel//LU Shengjie<sup>1</sup>, ZHU Hai<sup>1</sup>, XU Jieru<sup>1</sup>, WANG Lingling<sup>1</sup>, HUA Zulin<sup>2</sup>, WU Xianyang<sup>3</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)**

**Abstract:** To investigate the process of pollutant transport in sinuous open channel flow, a 3D hydrodynamic-pollutant coupled large-eddy simulation model was established according to the scalar tracer experiment. The influence of different release positions in transverse and vertical directions of point source on the concentration distribution in the downstream was analyzed. The results show that the streamwise velocity, vorticity and turbulent kinetic energy have clear relations and the secondary currents exert dominant impact on transport and mixing. Besides, the variance in transverse and vertical position of point source has significant influence on mixing efficiency and spatial distribution of pollutant. Specifically, the point source placed near the center of cross section in transverse direction or near the bottom of channel in vertical direction will result in a higher mixing efficiency and a wider influence range. There exists a positive correlation relationship between mixing rate and distribution range in the near field. The variance of point source position in a sinuous open channel mainly influences the pollutant's mixing within a single period.

**Key words:** sinuous open channel flow; point source pollutant; transport characteristics; mixing mechanism; large-eddy simulation

连续弯曲河道是自然河流较为常见的几何形态。在弯曲型边界的约束下,弯道水流同时受到不均匀向心力、壁面切应力和水面坡降所产生的压力梯度的共同作用,使得流场重分布,形成了复杂的三维螺旋流动<sup>[1]</sup>。由于弯道水流存在二次环流现象,同时具有较强的紊动特性,其中的物质输运和能量

交换过程更为复杂<sup>[2]</sup>。准确预测连续弯道水流中污染物的输运过程,是河流生态环境评估与水污染治理的基础<sup>[3]</sup>。在河流污染分布形式中,点源污染作为一种典型的集中排污方式将长期存在,通常以河岸排污口和水上突发污染事故的形式而广泛出现。

目前,针对弯道水流污染物输运问题已开展了

**基金项目:**国家重点研发计划(2021YFC3200403);中央高校基本科研业务费专项(B200204044);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251)

**作者简介:**陆圣杰(1997—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:sj\_lu@hhu.edu.cn

**通信作者:**朱海(1986—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:h.zhu@hhu.edu.cn

一些物理模型试验和数值模拟研究。在物理模型试验研究方面, Fischer<sup>[4]</sup> 根据理论推导和试验验证发现弯道环流显著影响物质输运过程, 并探究了横向扩散系数与平均流速、摩阻流速、水深和弯道曲率的关系; Chang<sup>[5]</sup> 开展了连续弯道内的水动力和标量示踪系列试验, 发现不同的点源释放位置会极大地影响示踪剂在下游的分布形态, 二次环流的存在加速了物质的输运与混合过程; 相比之下, Fukuoka<sup>[6]</sup> 做了宽深比更小的连续弯道试验, 该试验也得到了类似的结果; Marion 等<sup>[7]</sup> 基于试验讨论了流速梯度和二次环流对弯道溶质纵向扩散系数的影响; Baek 等<sup>[8]</sup> 结合理论推导和试验率定提出了常曲率弯道内污染物横向扩散系数的经验公式。在数值模拟方面, Duan 等<sup>[9-10]</sup> 采用沿深度平均的二维数值模型, 研究了瞬时释放的点源污染物在 S 形弯道内的输运过程, 但无法评估二次环流的影响; Demuren 等<sup>[11]</sup> 采用标准  $k-\varepsilon$  模型模拟了矩形截面弯道物质输运过程, 认为弯道内的横向环流相比于紊动效应对污染物的混合作用更加强烈; 申满斌等<sup>[12]</sup> 利用  $k-\varepsilon$  模型研究对比点源污染物在凸岸与凹岸释放的差异; 顾莉等<sup>[13]</sup> 模拟并比较了不同汇流比下 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的分布; Huang 等<sup>[14]</sup> 利用标准  $k-\varepsilon$  模型比较了不同密度污染物在蜿蜒河流的中心和边岸释放的差异, 还进一步研究了河流弯曲度对不同密度污染物输运过程的影响<sup>[15]</sup>; 丁敏<sup>[16]</sup> 借助 SMS 水质模型探讨了弯曲河段两岸排污口位置、河流流量和水深与污染混合区的几何参数的关系。在弯道水动力模拟上, 大涡模拟相比于上述雷诺时均模型能更好地展现细部涡体结构和湍流脉动信息<sup>[17-18]</sup>, 故采用更高阶的紊流模型是准确预测弯道水流结构和污染物混合过程的关键<sup>[19]</sup>。van Balen 等<sup>[20]</sup> 比较了不同的大涡模拟亚格子应力模型模拟弯道水流的结果, 所得流场几乎相同, 说明小尺度涡对流场结构影响很小。Moncho-Estevé 等<sup>[21]</sup> 利用大涡模拟复演了 Chang<sup>[5]</sup> 的连续弯道污染物输运试验, 模拟结果较为精确, 还揭示了污染物混合过程与二次环流的关系; van Balen 等<sup>[22]</sup> 采用大涡模拟比较了不同宽深比急弯弯道内持续释放线源污染物的输运过程, 并指出了线性梯度假设的局限性。

点源的释放位置将改变污染物在弯道下游的输运过程和分布形态<sup>[5-6]</sup>, 但现有研究大多是针对混合现象的定性描述, 利用高阶紊流模型开展三维定量研究和系统性分析的较少。本文利用开源代码 OpenFOAM, 基于大涡模拟的 Smagorinsky 亚格子应力模型, 构建连续弯道内单个周期的三维数值模型模拟水流结构和污染物输运混合过程, 研究不同点

源释放位置与下游污染物混合程度和分布范围的定量关系, 并探讨了水流结构与紊动特性对污染物输运过程的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程与数值方法

本文采用的大涡模拟控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程及污染物输运方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \bar{f}_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (D + D_t) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right] + \bar{S} \quad (3)$$

其中

$$D_t = \frac{\nu_t}{Sc_t}$$

式中:  $x$  为笛卡尔坐标;  $u$  为流速; 下标  $i, j$  均表示 3 个空间方向;  $t$  为时间;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为压强;  $\nu, \nu_t$  分别为运动黏度及亚格子黏度;  $f$  为体积力;  $c$  为被动标量;  $S$  为源项; 变量上加“-”代表大尺度可解变量;  $D, D_t$  分别为分子和紊动扩散系数;  $Sc_t$  为紊动施密特数, 经率定取 0.7。

Smagorinsky 亚格子应力模型由于形式简单、模拟准确而得到广泛应用。该模型将  $\nu_t$  表示为

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (4)$$

其中

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

式中:  $C_s$  为 Smagorinsky 常数;  $\Delta$  为截断尺度;  $S_{ij}$  为可解尺度的应变率张量。本文参考了部分大涡模拟明渠研究<sup>[20-21, 23]</sup>, 经验性常数  $C_s$  取 0.1。

控制方程的空间离散采用有限体积法, 离散格式为中心差分格式; 时间步进采用 backward 格式; 压力和速度解耦采用 PIMPLE 算法, 可在提高库朗数的同时保证计算稳定性。

### 1.2 边界条件

连续弯道水流具有周期性, 为了节省计算成本, 本文选取单个周期的 S 形弯道作为计算区域。对水动力场的进出口采用周期性边界条件, 可经过长时间的计算使水体流动达到紊流充分发展状态。通过设置沿坡降方向的附加体积力来等效替代明渠底坡的作用, 驱动水体流动。Demuren 等<sup>[11]</sup> 的研究表明, 对于水面超高小于 10% 水深的弯道明渠模拟, 可采用刚盖假定方法替代自由水面, 该方法也在弯道水流的数值模拟中得到广泛应用<sup>[20, 22-25]</sup>。本文工况满足

上述水深要求,且研究重点为连续弯道的流场和污染物输运,不关注自由水面变化,故采用刚盖假定方法。在壁面处,流速采用无滑移条件,压力和标量采用第二类边界条件,亚格子黏度采用了 OpenFOAM 中的壁面函数模型  $\text{nutUSpaldingWallFunction}$ , 可有效减少近壁网格数量。在上游进口区域,利用  $\text{scalarFixedValueConstraint}$  函数将此处的标量场强行设置为 0,从而避免下游出口的标量通过周期性边界回到上游,影响研究区域内的标量分布。

## 2 模型验证

本文选用 Chang<sup>[5]</sup> 的连续弯道水槽试验数据验证数值模型,该试验的几何和水动力参数也将作为后续工况设置的基础。试验水槽由 26 个完全相同的 90° 弯道组合而成,各弯道通过直道相连,相邻弯道交错反向弯曲,构成了连续型弯道。图 1 为单个 S 形弯道的几何信息,其沿中心线总长度为 3.823 m,水槽横截面为矩形,截面宽度  $W$  为 0.254 m,水深  $H$  为 0.057 m。水槽整体向下游倾斜,坡度为 0.0012。该试验采用的标量示踪剂是盐和甲醇的混合溶液,其密度与水大致相同。示踪剂注射装置可调节释放流量,使溶液的注射速度和周围水流速度几乎相同,故可视为持续释放的点源污染物。

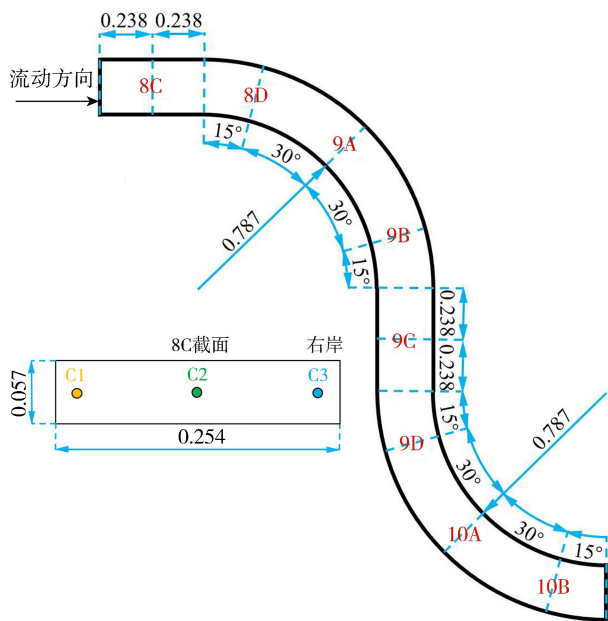


图 1 弯道几何信息及点源释放位置(单位:m)

通过调整水槽坡度和水泵流量,弯道内的水流流态将达到预设的水力参数,即宽深比为 4.47,水力半径  $R$  为 0.039,坡降  $S$  为 0.0012,摩阻流速  $u^*$  为 0.0214 m/s,平均流速  $u_{av}$  为 0.354,阻力系数  $f$  为 0.0293,  $Re$  为 40000,  $Fr$  为 0.473。试验中,示踪剂在 8C 截面(即第 8 段弯道起始处)的靠近左岸、水槽中心、靠近右岸的中间水深处释放,分别命名为

C1、C2 和 C3。其中 C1 和 C3 工况距离对应边壁 0.0254 m ( $W/10$ ),具体释放位置见图 1。试验中测量了 8C 到 10B 共计 8 个截面(见图 1)的纵向流速和示踪剂浓度分布,各截面均位于流态充分发展的水槽后半段。

数值模型计算域见图 1,该 S 形弯道由两个反向弯曲的 90° 弯道和两段直道构成。采用结构化网格剖分计算区域,进口边界的左岸底部为坐标原点,分别定义横向(展向)、纵向(流向)、垂向为  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴方向。模型网格沿纵向均匀划分,由于近壁处的流速梯度较大,对垂直壁面方向的网格加密并考虑壁面模型对于无量纲壁面距离  $y^+$  和  $z^+$  的要求。经过网格无关性检验,最终确定模型网格数量为 440(纵向)×120(横向)×40(垂向)=211.2 万。计算区域网格划分见图 2,由于网格线较为密集,为了清晰展示,图 2(a)给出了左半边截面的网格,图 2(b)每隔 3 个网格显示一次网格线。

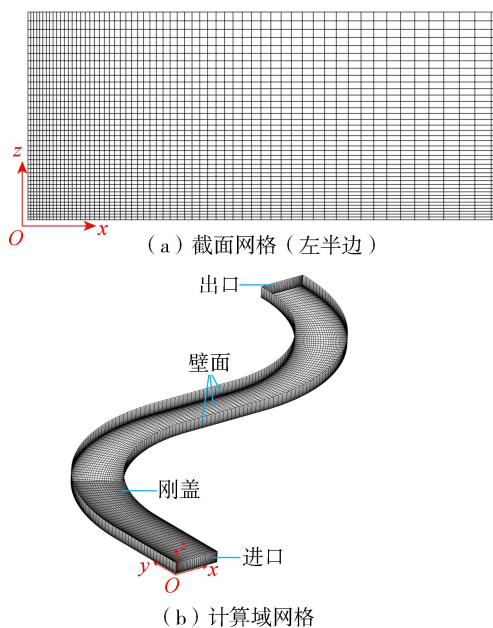


图 2 网格划分及边界位置

### 2.1 弯道水动力结果验证

图 3 是经过  $u_{av}$  无量纲化的水深平均纵向流速  $u_h$  的横向分布。水深平均纵向流速与试验值吻合较好,能准确反映速度分布情况。这表明本文建立的数值弯道水槽能反映流场的分布趋势,较好地预测连续弯道的水动力场。图 3 的数据呈轴对称分布,即弯道前、后半段对应位置的纵向流速分布几乎为对称形态,这是由连续弯道的几何性质导致的。

### 2.2 弯道污染物分布结果验证

图 4 为沿水深平均的污染物浓度  $c_h$  在各截面上的横向分布。浓度  $c_h$  经截面平均浓度  $c_s$  无量纲化,  $c_s$  的定义<sup>[5]</sup>如下:

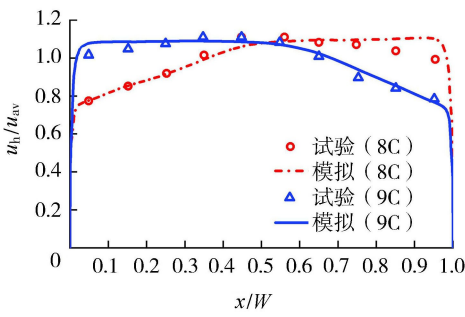
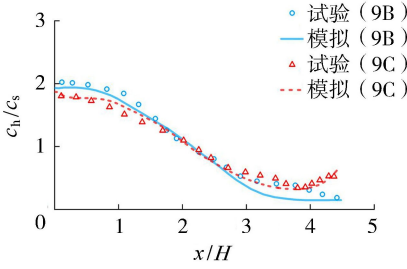
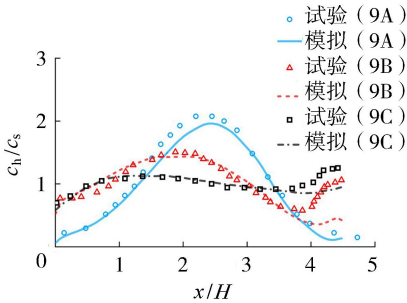


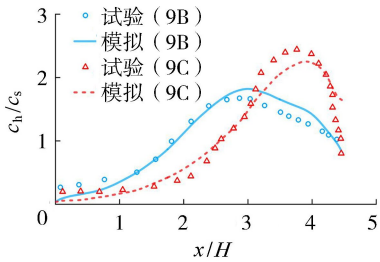
图3 部分截面沿水深平均纵向流速的横向分布



(a) C1工况(9B和9C截面)



(b) C2工况(9A、9B和9C截面)



(c) C3工况(9B和9C截面)

图4 部分截面沿水深平均的污染物浓度横向分布

$$c_s = \frac{H}{Q} \sum_{i=1}^n (c_{hi} u_{hi} \Delta x) \quad (5)$$

式中: $H$ 为水深; $Q$ 为流量; $\Delta x$ 为横向间隔长度。各截面的污染物浓度横向分布与实测值总体趋势一致,除个别近壁区域存在偏差,绝大部分点位吻合较好,可认为该数值模型较为准确地模拟了污染物的浓度分布。

### 3 不同点源释放位置的污染物混合特性

#### 3.1 工况设置

工况设置见图5, S1~S5点源均位于1号截面的 $0.9H$ 水深处,分别距左岸 $0.1W$ 、 $0.3W$ 、 $0.5W$ 、

$0.7W$ 和 $0.9W$ ,用于研究点源横向位置的影响; H1~H3点源均位于1号截面的中轴线处,分别距离底床 $0.05H$ 、 $0.5H$ 和 $0.95H$ ,用于研究点源垂向位置的影响。各工况的水动力条件与前述试验相同;计算约 $20T$ ( $T$ 为流动周期,定义为弯道中心线长度与截面平均流速的比值)后达到紊流充分发展状态,再计算约 $20T$ 用于统计流场与标量场的时均值,各工况计算时长约500核时(CPU: Intel Xeon 6240R, 2节点,每个节点48核)。共设置12个典型监测截面,位置分布见图5。

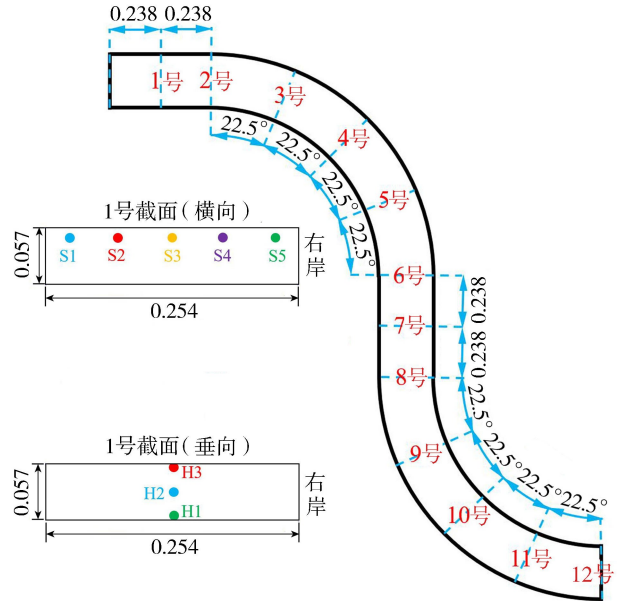


图5 不同工况的点源释放位置(单位:m)

#### 3.2 时均水流结构与紊动特性

图6为典型截面的无量纲纵向流速分布云图(视角为顺水流方向,后续云图均采用相同视角)。模拟结果显示:主流区( $u/u_{av} \geq 1.1$ 的区域)在弯道进口前逐步偏向凸岸,并在弯道进口后完全分布于凸岸一侧;而在4号截面(图6(d))后,主流区又转向凹岸方向;直到6号截面(图6(f))附近,主流区回归截面中心,并在下一个弯道重复上述过程。在2~4号截面(图6(b)~(d)),主流区范围较小,流速峰值较大,与近壁的低流速区之间存在较大的流速梯度。图7的水动力轴线反映了主流区的横向位置变化过程,水动力轴线在弯道内偏向凸岸分布,并在2号截面后逐步转移到另一侧,具有沿最短路径行进的特征。

弯道的二次环流将主流区由凸岸转向凹岸,实现动量传输<sup>[26]</sup>,是弯道水流最显著的特征。典型截面时均纵向涡量 $\omega_\theta$ (经 $u_{av}/R$ 无量纲化)与环流矢量(经 $u_{av}$ 无量纲化)分布(图8)表明各截面均存在多个环流,且在4个顶点处形成了强度不一的小尺度环流结构,在近底处出现横跨大半个截面的扁平

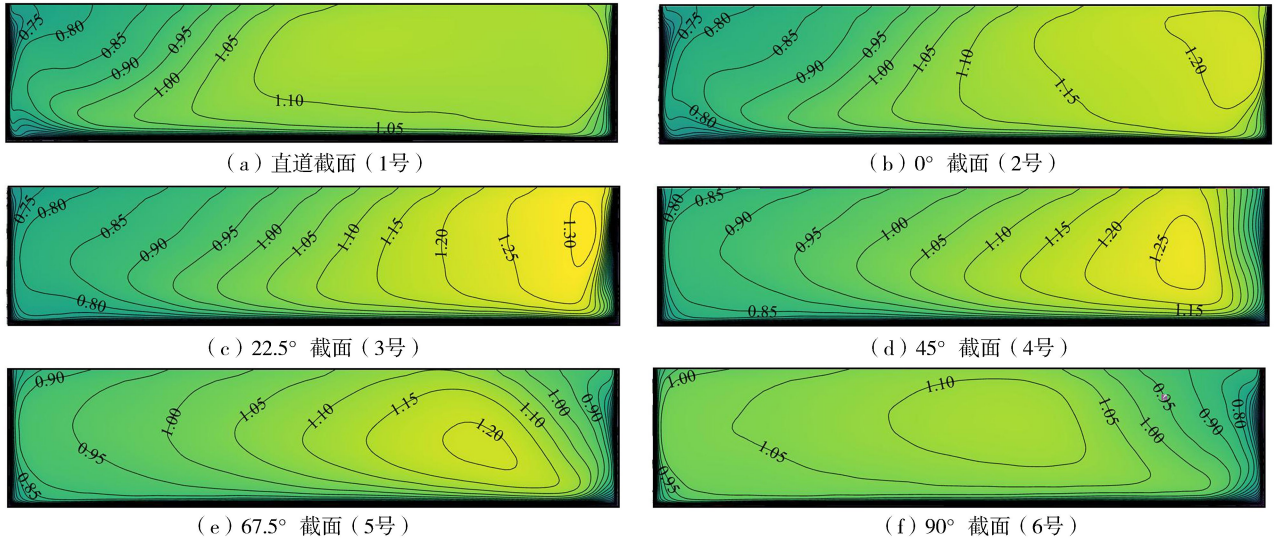


图6 典型截面的时均纵向流速分布

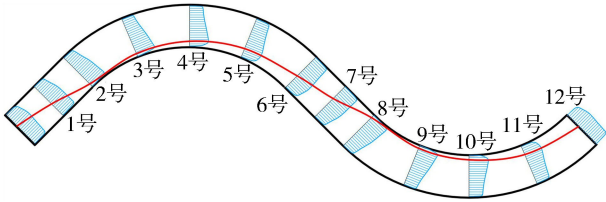


图7 沿水深平均的纵向流速分布和水动力轴线

中心环流,其旋转方向与截面中上部的环流方向相反。与图6的纵向流速相比可发现:主流区的涡量较小,而涡量较大的区域则位于边壁的低流速区;在3~6号截面(图8(c)~(f))的右岸近底部,涡量数值较大,存在强烈的环流运动,此处的纵向流速梯度也较大。

紊动能是表征紊动强弱程度的指标。数值模拟结果(图9)表明,各截面的主流区紊动能较小,紊动

能最大值集中于边壁附近。与图6对比,最小紊动能的位置位于纵向流速较大的区域,而纵向流速较小的区域伴随着较大的紊动能,这与低流速区存在复杂旋涡以及环流结构有关。与图8对比,最大紊动能与最大涡量的位置几乎重合,这说明紊动能的大小与弯道环流的强弱呈正相关(图10)。

综上所述,纵向流速、环流结构和紊动强度之间存在关联。纵向流速较大的主流区环流强度较弱,其涡量和紊动能数值较低;对于22.5°至90°之间的弯段,纵向流速在靠近凸岸侧存在明显的低流速区,与邻近的高流速区之间形成了大流速梯度的剪切层,在剪切作用下形成了纵向旋涡<sup>[27]</sup>,大大增强紊动强度,使水流结构更为复杂。图11为 $Z=H/2$ 截面的 $z$ 方向涡量云图,可以发现两个凸岸的顶部及

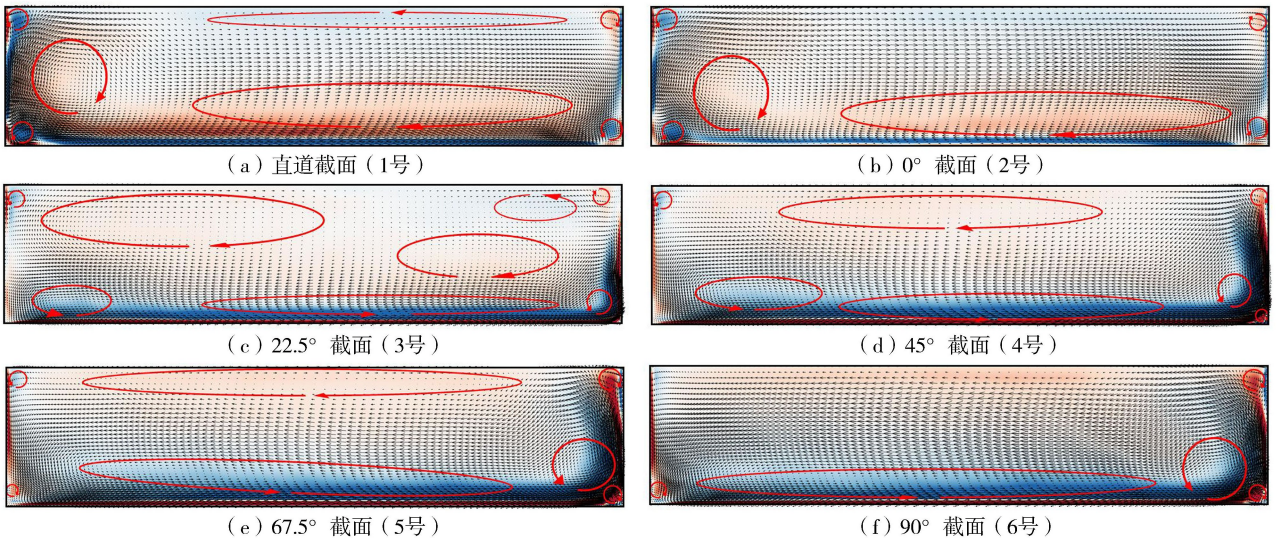
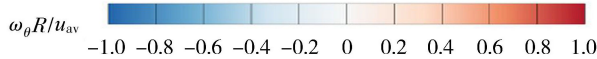


图8 典型截面的时均涡量云图和流速矢量云图



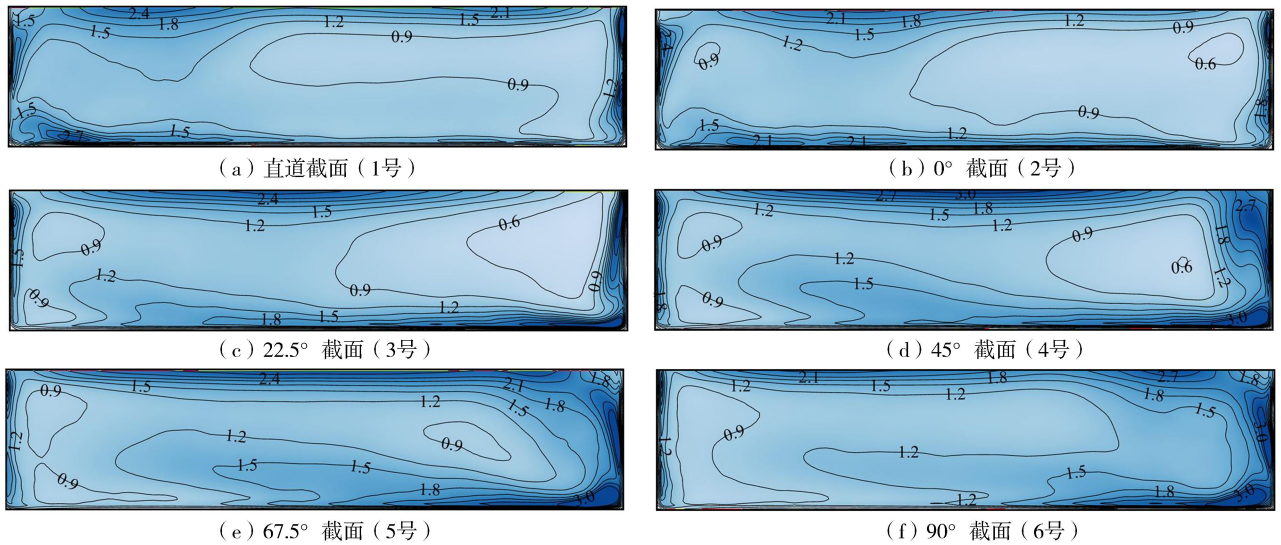
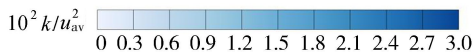


图9 典型截面的时均紊动能分布

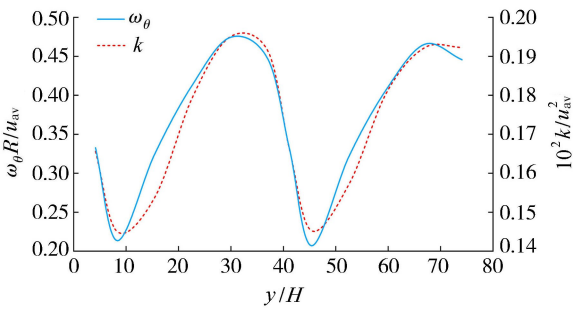


图10 截面平均涡量与平均紊动能的沿程分布

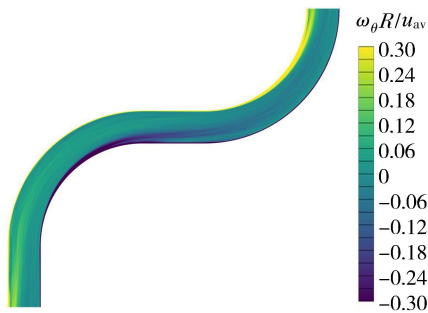


图11  $Z=H/2$  截面的  $z$  方向涡量分布

其下游形成了强度相当但方向相反的一对涡旋,这是由剪切层的 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应产生的,此处的纵向流速梯度、涡量和紊动能均较大。

### 3.3 污染物时均浓度场

点源横向布设位置的差异将显著影响污染物浓度分布。图12为S1和S5工况的下游截面污染物浓度分布。左岸S1点源释放后,污染物迅速到达底部,底部污染物持续向右岸输移,在4号截面处,底部污染物到达右岸并向上移动。右岸S5点源释放后,污染团也很快到达底部,顶部的污染物持续向左岸输移,污染团中心逐步向截面中心移动。在8号截面处,S1污染团集中于右岸底部,而S5偏向左岸水面处。

点源污染物垂向释放位置的差异也将显著影响近场的污染物浓度分布。H1和H3具有不同的污染物输运过程,下游浓度分布仍存在很大差异,底层释放工况的高浓度污染物易聚集在右岸,而表层释放工况高浓度污染物易聚集在左岸(图13中4号截面)。这表明在较小宽深比的弯曲河道中,污染物经点源释放后在近场的三维特征较为明显,因此沿水深平均的二维数值模型将难以准确预测小宽深比弯道明渠内污染物浓度的近场分布。

对比图8的环流结构可发现,各工况的污染物输运过程和二次环流结构存在关联。2号截面中上部存在大范围自左岸向右岸的流动,该流动范围在后续截面持续缩减,直至在6号截面消失;而2号截面近底部存在自右岸向左岸的小区域流动,该区域在后续截面持续扩大,直至在6号截面几乎占据全截面;从3号截面开始,底部持续存在自左岸向右岸的流动。上述横向流速的存在导致污染物在表层和底层输移过程的差异。截面顶角处的小尺度环流结构是导致垂向迅速运输的重要原因。此外,4~6号截面的右岸底部存在强烈的紊动,但此处的污染物混合并不明显,相比之下二次环流的对流作用占据了主导。

### 3.4 瞬时流场和污染物浓度场

瞬时流场与浓度场反映某一时刻的实际流场结构与污染物分布状态,图14~16为4号截面(弯道顶部)和7号截面(直道中部)的瞬时场。相较于时均场,瞬时场的纵向流速分布更不均匀,仅在大体趋势上较为相似。涡量分布方面,时均场中4号截面(图8(d)右下角集中存在较强的涡流结构,而瞬时场的涡量分布较为分散。此外,瞬时浓度场的污染团在截面中的位置和形态与时均场存在明显差异。

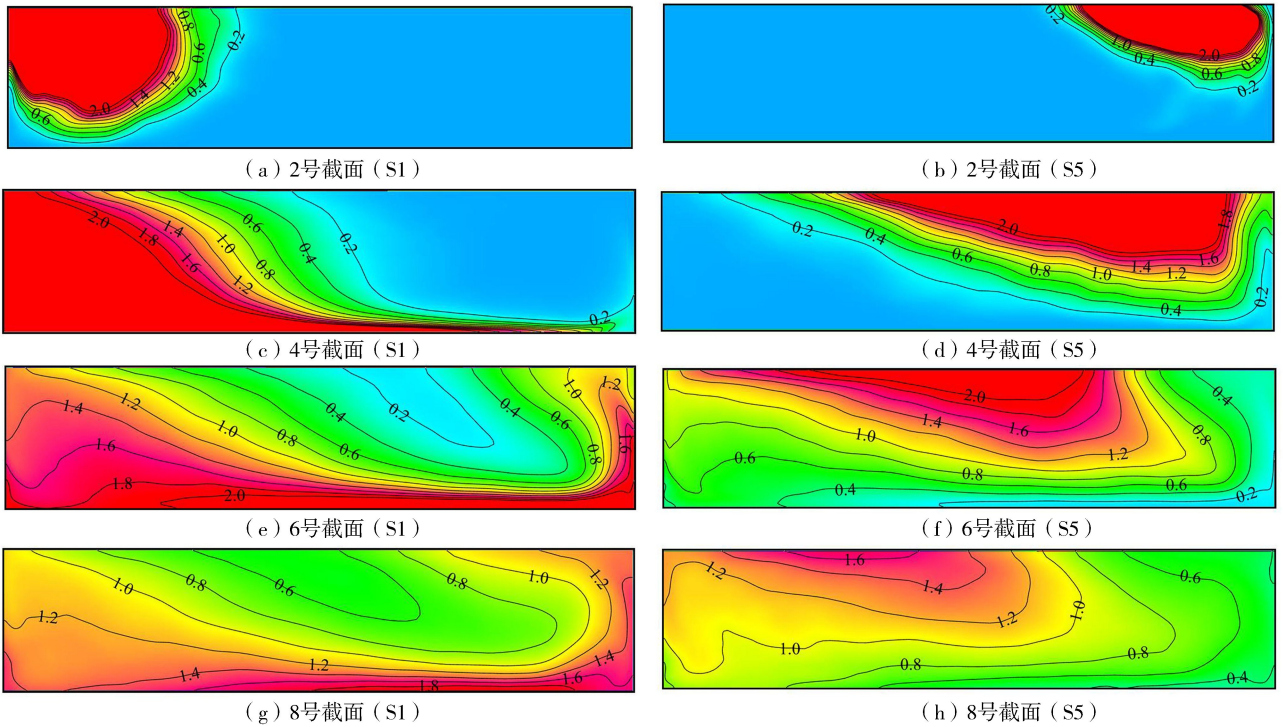
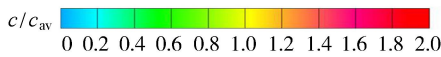


图 12 S1 和 S5 工况的污染物时均浓度分布云图

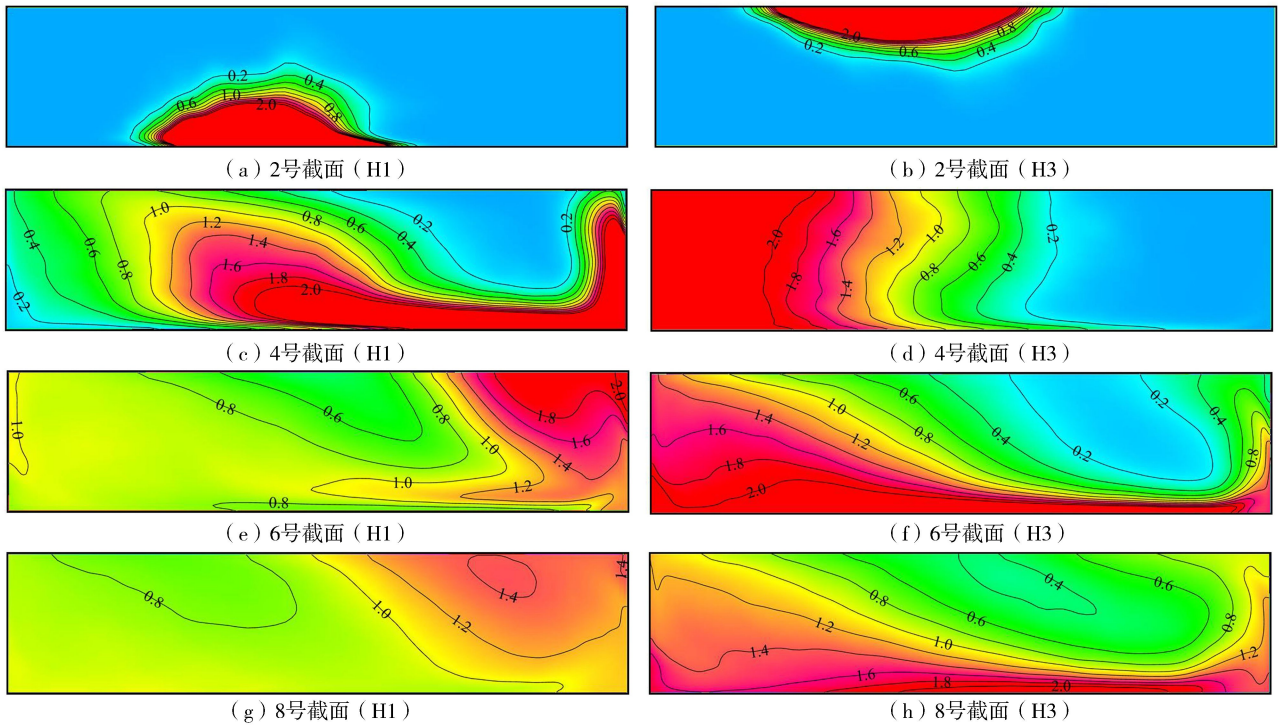
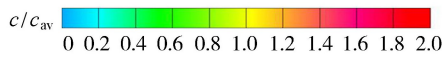


图 13 H1 和 H3 工况的污染物时均浓度分布云图

### 3.5 污染物混合速率

为衡量各工况的污染物混合速率,本文选取空间混合程度  $c_m$ <sup>[28]</sup>用于表征污染物浓度空间分布的均匀程度,该参数本质上是无量纲化的浓度均方根:

$$c_m = \frac{1}{c_{av}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - c_{av})^2} \quad (6)$$

式中: $c_{av}$ 为截面平均浓度; $c_i$ 为经插值后均布于截面上不同位置的浓度值。 $c_m$ 数值越小,表明混合程度越高。

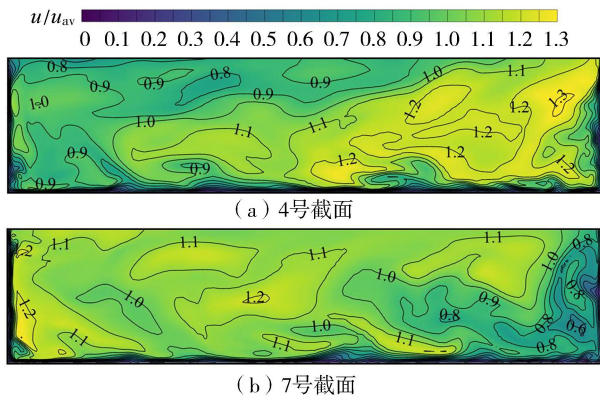


图 14 4 号和 7 号截面瞬时纵向流速

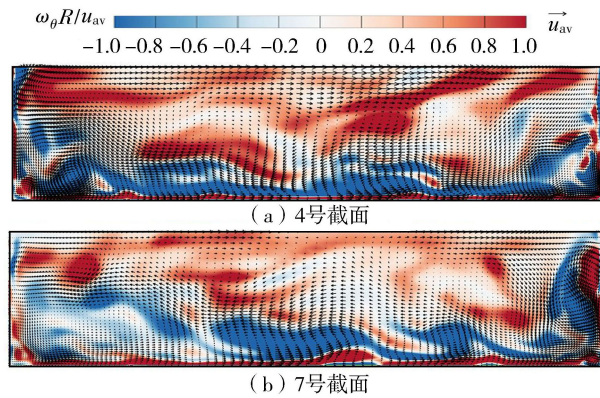


图 15 4 号和 7 号截面瞬时涡量及环流矢量

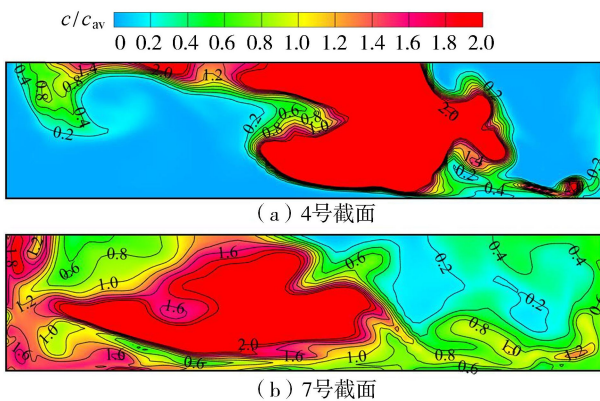


图 16 4 号和 7 号截面污染物瞬时浓度分布

S1 ~ S5 的  $c_m$  沿程变化曲线见图 17(a), 鉴于 1 号截面污染物聚集, 浓度均方根很大, 故从 2 号截面开始统计。图中显示各工况  $c_m$  在上游截面(2 号截面,  $y/H=8.4$ )存在明显差异; 其中 S1 在弯道进口处对应  $c_m$  最小, 混合程度最好。进入弯道后, S1 ~ S5 的  $c_m$  迅速下降; 在中游截面(6 号截面,  $y/H=33.5$ )处, 各工况的  $c_m$  值差距逐渐减小; 下游截面(12 号截面,  $y/H=67.1$ )处的  $c_m$  曲线近乎重合, 可认为各工况的混合程度近乎相同, 点源横向释放位置的影响基本可以忽略。总体上, S1 ~ S5 的  $c_m$  均沿程持续下降, 说明各工况污染物混合程度沿程变大。虽然 S3 和 S4 在第一段弯道前半段的  $c_m$  较大, 但在后半段中, S3 的  $c_m$  反超其他工况; 而 S4 在离

开弯道后, 其  $c_m$  一直较小, 说明 S3 和 S4 混合更快, 经过弯道水流作用的混合效率最高。而 S5 的  $c_m$  全程保持最高, 其混合效果最差。S1 ~ S5 的沿程  $c_m$  平均值分别为 0.358、0.361、0.334、0.351 和 0.519, 也充分说明 S3 与 S4 的混合效果最好。

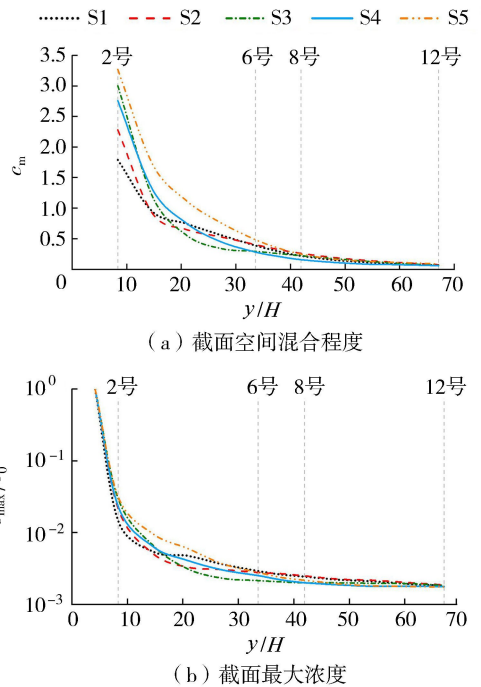
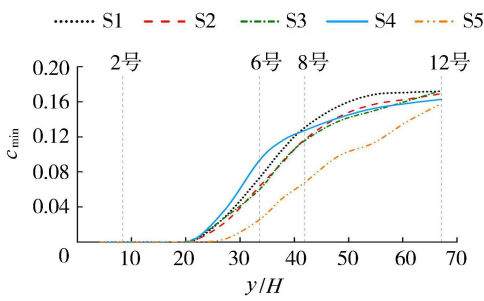


图 17 截面空间混合程度和截面最大浓度沿程变化(S1 ~ S5)

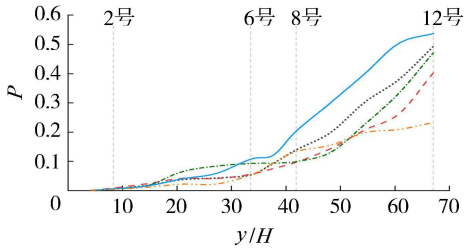
截面最大浓度  $c_{max}$  也可间接反映污染物的混合情况<sup>[21]</sup>。 $c_{max}$  的沿程变化(图 17(b))显示: S1 ~ S5 在进入弯道前,  $c_{max}$  的绝对数值急剧下降, 且下降过程近乎一致, 说明各工况的点源污染物在释放后的浓度峰值衰减迅速, 且衰减速率和横向布置位置无关。在第一段弯道内, 各工况  $c_{max}$  持续下降, 直到 6 号截面( $y/H=33.5$ ),  $c_{max}$  下降速率趋于平缓。在 12 号截面( $y/H=67.1$ ), 各工况  $c_{max}$  近乎相同。横向比较 S1 ~ S5 可发现: S3 在第一段弯道中部到第二段弯道进口之间,  $c_{max}$  持续保持最低, 后陆续被 S4 和 S5 反超。考虑到 S5 的  $c_{max}$  在第一段弯道内数值较高, 故可认为 S3 和 S4 是混合最好的工况。

截面最小浓度  $c_{min}$  可间接表征污染物对水体的影响程度, 也可衡量污染物在水体内的混合速率。图 18(a) 为 S1 ~ S5 的  $c_{min}$  沿程变化, 各工况  $c_{min}$  呈现先快后慢的持续上升趋势。其中 S1 ~ S4 的  $c_{min}$  几乎在同一位置上升, 说明污染物在此处开始占据整个截面。在 12 号截面( $y/H=67.1$ )处, S1 和 S3 的  $c_{min}$  达到最大, 但与其他工况差异不大。S5 的  $c_{min}$  全程小于其他工况, 说明其在弯道内的混合效果较差。

污染物在水体中输运时, 截面最大浓度将持续下降(图 17(b)), 最小浓度将从 0 持续上升



(a) 截面最小浓度



(b)  $\pm 5\%$ 浓度范围占截面面积百分比

图 18 截面最小浓度和截面 $\pm 5\%$ 浓度范围占截面面积百分比沿程变化(S1~S5)

(图 18(a)), 直至污染物在全截面混合均匀, 浓度保持不变, 此时的浓度可称作完全混合浓度  $c'_m$ 。若全截面浓度均在  $\pm 5\% c'_m$  范围内, 可认为污染物充分混合<sup>[29]</sup>。图 18(b) 统计了  $\pm 5\% c'_m$  浓度范围包围面积  $A'$  占总截面面积  $A_{cs}$  的百分比  $P$  (即  $P=A'/A_{cs}$ ), S1~S5 的  $P$  值沿程增大, 但曲线的上升速率有所不同。在 12 号截面 ( $y/H=67.1$ ) 处, 各工况  $P$  值差异较为明显, 其中 S4 的  $P$  值最大, 截面上充分混合的区域占比较大, 混合速率最高; S5 工况的情况相反, 混合不明显。

H1~H3 的  $c_m$  沿程变化曲线(图 19(a)) 表明 H2 在第一段弯道的混合速率最高, 后被 H1 反超; 在第二段弯道的出口处, 各工况的  $c_m$  近乎相同。

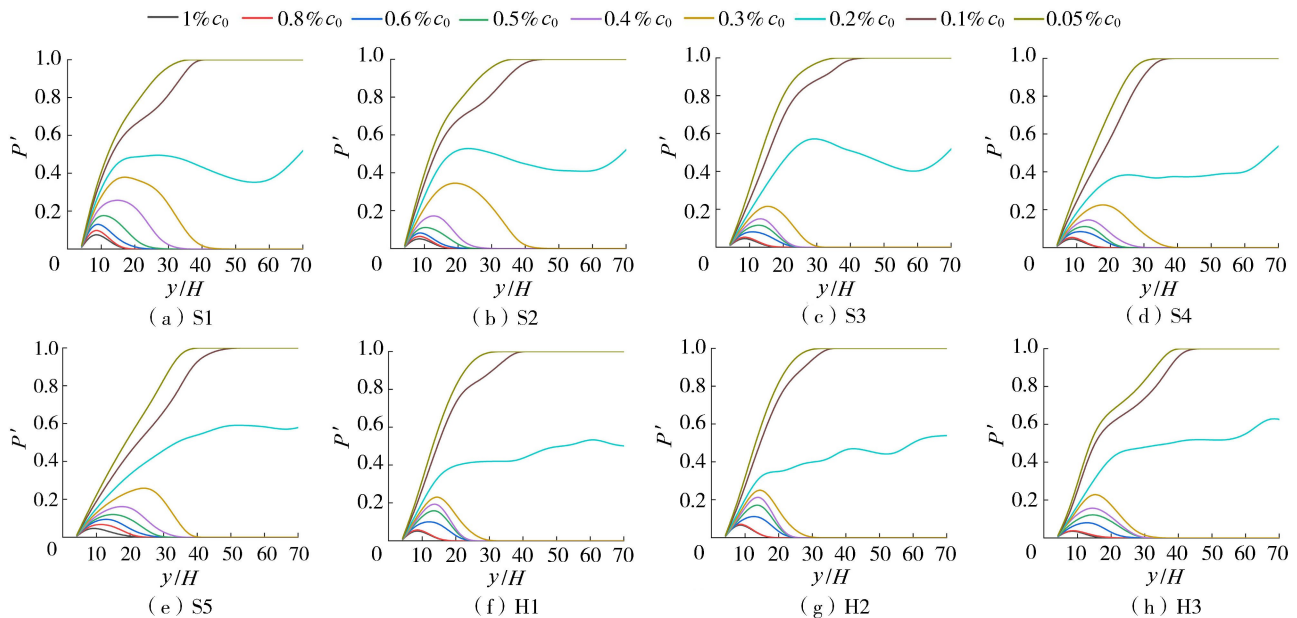
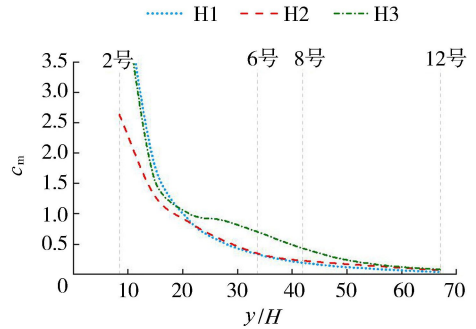
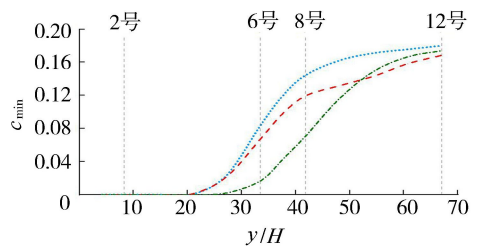


图 20 各浓度区间占截面百分比沿程变化

H1~H3 的沿程  $c_m$  平均值分别为 0.443、0.413 和 0.588。 $c_{min}$  沿程变化曲线(图 19(b)) 表明 H1 的混合效果最好; 而在第二段弯道的出口处, 各工况  $c_{min}$  较为接近。总体来说, 点源在垂向上布置位置的差异将影响近场处的混合效率, 当点源靠近底床将获得更高的混合速率, 当点源靠近水面将使混合减慢; 在第二段弯道的出口处, 各工况的指标趋于相同, 不再体现垂向释放位置差异对混合的影响。



(a) 截面空间混合程度



(b) 截面最小浓度

图 19 截面空间混合程度和截面最小浓度沿程变化(H1~H3)

### 3.6 污染物影响范围

污染物空间分布及影响范围的确定也是河流生境评估的基础。图 20 统计了截面上大于某浓度等

值线的区域占总截面面积百分比  $P'$  的沿程变化,浓度等值线的划分依据初始浓度  $c_0$ ,图上相邻曲线之差即为两相邻浓度等值线包围的面积占截面的比率。可以直观地发现,S1~S5的 $P'$ 曲线总体趋势一致:在第二段弯道进口前,0.3% $c_0$ 曲线都降至0,0.2% $c_0$ 在0.4至0.6区间内波动,而0.1% $c_0$ 几乎都升至1,说明此处S1~S5的全截面浓度均在0.1% $c_0$ 至0.3% $c_0$ 之间。横向比较可发现,S5的曲线整体偏向右侧,说明S5混合效率低,导致污染物在释放后的一段距离内影响范围更小。H1~H3的 $P'$ 沿程变化曲线趋势一致,而H3的0.1% $c_0$ 和0.05% $c_0$ 曲线在偏后的位置到达1。说明H1~H3的污染物分布范围基本相同,但H3的污染团在近场的影响范围较小。

## 4 结论

**a.** 由于连续弯道的几何特性,弯道前、后半段的水动力结构呈轴对称分布。弯道内主流区靠近凸岸,水动力轴线沿最短路径分布。连续弯道水流的时均纵向流速、环流结构、紊动能之间存在密切关联。在纵向流速较大的主流区,涡量与紊动能数值较小;而纵向流速梯度较大的区域形成剪切层,该区域的涡量与紊动能更大。横截面顶角处形成了涡量与紊动能均较大的小型环流结构。

**b.** 相比于紊动扩散,大尺度环流对污染物的输运及混合起主导作用。弯道内污染物的分布均随大尺度环流的方向与强度而变化,截面顶部与底部的横向流动显著加剧了污染物的横向输运。横截面顶角处的小型环流加速了污染物的垂向输运,而弯顶凸岸的剪切层对污染物的混合作用不明显。

**c.** 点源的横向布设位置对下游污染物的混合速率与分布范围存在较大影响。当点源布置于弯道进口中部及偏右岸位置时,污染物在下游的混合速率更快,影响范围较广;当点源布置在弯道进口右岸位置时,混合速率偏低,在近场的影响范围更小;当点源布置于弯道进口偏左岸位置时,污染物在下游的混合速率及影响范围居中。混合效果最好的工况对应空间混合程度的沿程平均值为0.334。

**d.** 点源的垂向布设位置能显著改变污染物的近场输运过程,使污染物的近场分布表现出明显的三维特征。当点源释放位置位于水深中部或靠近底床,污染物的混合效率较高;当点源释放位置靠近水面,污染物混合效率较低,影响范围偏小。混合效果最好的工况对应空间混合程度的沿程平均值为0.413。

## 参考文献:

[1] BLANCKAERT K, DE VRIEND H J. Secondary flow in

sharp open-channel bends [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 498: 353-380.

[2] 李民康, 冀鸿兰, 罗红春, 等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(3): 41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(3): 41-49. (in Chinese))

[3] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮河干流污染物分布及变化规律[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(1): 29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(1): 29-38. (in Chinese))

[4] FISCHER H B. The effect of bends on dispersion in streams [J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(2): 496-506.

[5] CHANG Y C. Lateral mixing in meandering channels [D]. Iowa: University of Iowa, 1971.

[6] FUKUOKA S. Longitudinal dispersion in sinuous channels [D]. Iowa: University of Iowa, 1971.

[7] MARION A, ZARAMELLA M. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(12): 1295-1302.

[8] BAEK K O, SEO I W. Transverse dispersion caused by secondary flow in curved channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(10): 1126-1134.

[9] DUAN J G. Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(10): 964-976.

[10] BAEK K O, SEO I W, JEONG S J. Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from transient tracer tests [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 132(10): 1021-1032.

[11] DEMUREN A O, RODI W. Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 172: 63-92.

[12] 申满斌, 陈永灿. 明渠弯道水流及污染物输移特性研究 [C]//第六届全国环境水力学学术会议. 北京: 中国水利学会, 2004: 10-16.

[13] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对U形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(3): 189-195. (in Chinese))

[14] HUANG Heqing, CHEN Guang, ZHANG Qianfeng. The distribution characteristics of pollutants released at

- different cross-sectional positions of a river [ J ]. *Environmental Pollution*,2010,158(5) :1327-1333.
- [ 15 ] HUANG Heqing, CHEN Guang, ZHANG Qianfeng. Influence of river sinuosity on the distribution of conservative pollutants [ J ]. *Journal of Hydrologic Engineering*,2012,17(12) :1296-1301.
- [ 16 ] 丁敏. 弯曲河段污染混合区特性变化规律研究[ D ]. 青岛: 青岛理工大学,2016.
- [ 17 ] BOOIJ R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes[ J ]. *Journal of Turbulence*, 2003,4(4) :N8.
- [ 18 ] STOESSER T, RUETHER N, OLSEN N R B. Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel [ J ]. *Advances in Water Resources*,2010,33(2) :158-170.
- [ 19 ] KHOSRONEJAD A, RENNIE C D, NEYSHABOURI S A A S, et al. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends [ J ]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2007,133(10) :1123-1134.
- [ 20 ] VAN BALEN W, BLANCKAERT K, UIJTTEWAAL W S J. Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS[ J ]. *Journal of Turbulence*, 2010,11(12) :N12.
- [ 21 ] MONCHO-ESTEVE I J, FOLKE F, GARCÍA-VILLALBA M, et al. Influence of the secondary motions on pollutant mixing in a meandering open channel flow [ J ]. *Environmental Fluid Mechanics*,2017,17(4) :695-714.
- [ 22 ] VAN BALEN B, UIJTTEWALL W S J, BLANCKAERT K. Scalar dispersion in strongly curved open-channel flows [ C ]//River Flow. Braunschweig: Bundesanstalt für Wasserbau,2010:169-177.
- [ 23 ] HINTERBERGER C, FRÖHLICH J, RODI W. Three-dimensional and depth-averaged large-eddy simulations of some shallow water flows [ J ]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2007,133(8) :857-872.
- [ 24 ] XU Dong, BAI Yucuan, MUNJIZA A, et al. Investigation on the characteristics of turbulent flow in a meandering open channel bend using large eddy simulation[ C ]//35th IAHR World Congress. Beijing: IAHR,2013.
- [ 25 ] VAN BALEN W, UIJTTEWAAL W S J, BLANCKAERT K. Large-eddy simulation of a mildly curved open-channel flow[ J ]. *Journal of Fluid Mechanics*,2009,630:413-442.
- [ 26 ] 张炳昌, 许栋, 及春宁, 等. 大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[ J ]. *水力发电学报*,2019,38(6) :77-91. (ZHANG Bingchang, XU Dong, JI Chunqing, et al. Large eddy simulations of hydrodynamic structure in channel bends with large width-depth ratios and variable curvatures [ J ]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019,38(6) :77-91. (in Chinese) )
- [ 27 ] KOKEN M, CONSTANTINESCU G, BLANCKAERT K. Hydrodynamic processes, sediment erosion mechanisms, and Reynolds-number-induced scale effects in an open channel bend of strong curvature with flat bathymetry[ J ]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*,2013,118(4) :2308-2324.
- [ 28 ] DENEV J A, FRÖHLICH J, BOCKHORN H. Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport [ J ]. *Physics of Fluids*, 2009,21(1) :015101.
- [ 29 ] POUCHOULIN S, MIGNOT E, RIVIÈRE N, et al. Numerical simulations on mixing of passive scalars in river confluences [ J ]. *E3S Web of Conferences*, 2018, 40: 05019.

( 收稿日期:2022-03-24 编辑:俞云利)

( 上接第 8 页)

- [ 28 ] 潘志刚, 林祥峰, 张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[ J ]. *水利水电科技进展*,2021,41(6) :78-81. ( PAN Zhigang, LIN Xiangfeng, ZHANG Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine[ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2021,41(6) :78-81. (in Chinese) )
- [ 29 ] 王飞, 姚磊华, 张彬, 等. 桥墩局部冲刷动态模拟及不同截面的冲刷特性[ J ]. *水利水电科技进展*,2018,38(3) :81-87. ( WANG Fei, YAO Leihua, ZHANG Bin, et al. Dynamic simulation of local scour around bridge piers and scouring characteristics of piers with different cross sections [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2018,38(3) :81-87. (in Chinese) )
- [ 30 ] KHOSRAVINIA P, MALEKPOUR A, HOSSEINZADEHDALIR A, et al. Effect of trapezoidal collars as a scour countermeasure around wing-wall abutments [ J ]. *Water Science and Engineering*,2018,11(1) :53-60.
- [ 31 ] TANG T C C, DAVAR K S. Resistance to flow in partially-covered channels [ R ]. Fredericton: University of New Brunswick,1985.
- [ 32 ] CAREY K L. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin [ R ]. Reston: U. S. Geological Survey Professional Paper,1966:192-198.
- [ 33 ] FU Hui, GUO Xinlei, KASHANI A H, et al. Experimental study of real ice accumulation on channel hydraulics upstream of inverted siphons[ J ]. *Cold Regions Science and Technology*,2020,176:103087.

( 收稿日期:2022-05-22 编辑:俞云利)

# 基于分位数回归的升船机变形监控模型构建方法

杨晨昊<sup>1,2</sup>, 郑东健<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为深入分析升船机变形影响因素,提出了一种基于分位数回归的升船机变形监控模型构建方法。该方法根据升船机的结构特点,将温度、前期上游水位均值等因素引入候选影响因子集,采用自适应弹性网络分位数回归对影响因子进行筛选,建立各分位数下的回归模型,并根据拟合的良好性和检验的有效性原则选出最优的升船机变形监控模型。实例验证结果表明:相对于常规的逐步回归模型,本文方法构建的最优模型的预测精度波动性小,具有较强的稳定性,同时具有良好的长期预测能力。

**关键词:**升船机变形;变形预测;分位数回归;自适应弹性网络;模型优选方法

**中图分类号:**TV698 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0027-06

**Construction method for ship lift deformation monitoring model based on quantile regression//**YANG Chenhao<sup>1,2</sup>, ZHENG Dongjian<sup>1,2</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To deeply analyze the influence factors of ship lift deformation, a method for building ship lift deformation monitoring model based on quantile regression is proposed. Based on the structural characteristics of the ship lift, the influence factors such as air temperature and mean value of upstream water level in early stages are introduced into the candidate influence factor set. Adaptive elastic net penalized quantile regression is used for choosing the influence factors of ship lift deformation and building the quantile regression model. The optimal model can be obtained based on the principle of good fitting and validity check. Example verification shows that compared with traditional stepwise regression model, the proposed optimized model has low volatility for prediction accuracy with strong stability, indication a good ability for long term prediction.

**Key words:** ship lift deformation; deformation prediction; quantile regression; adaptive elastic net; model optimization method

对水工建筑物进行安全监控是保障水利工程安全运行的主要手段<sup>[1]</sup>。升船机在水利工程中发挥着通航功能,它的安全不仅关乎水利工程的整体安全,也保障了江河的通航能力,具有积极的经济作用<sup>[2]</sup>。随着我国升船机数量的增加<sup>[3]</sup>,探究升船机的安全监控方法具有重要的理论价值和现实意义。

变形是掌握和分析升船机工作性态的重要因素<sup>[1]</sup>,常用的水工建筑物变形预测模型可分为最小二乘回归类和智能算法类<sup>[4-5]</sup>,但这两类方法都存在一定的局限性:最小二乘回归类假设随机误差项服从正态分布,对异常值敏感<sup>[6]</sup>;智能算法类计算

复杂度高,而且不利于工程师对监测量物理成因进行把握<sup>[7]</sup>。

自适应弹性网络(adaptive elastic net)可以较好地对变量进行筛选,从而可以避免因候选影响因子过多而影响模型的可解释性及计算复杂度。分位数回归数学形式简单,无须假设随机误差的分布形式,适用于异方差情况,稳健性强,且更关注因变量局部信息,因此更适合挖掘数据信息<sup>[6]</sup>。目前,分位数回归已在经济学、水文学等<sup>[8-9]</sup>专业得到了较好的应用,而将分位数回归应用于升船机变形监控模型尚未见报道。

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52179128)

**作者简介:**杨晨昊(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监测研究。E-mail:1418132626@qq.com

**通信作者:**郑东健(1965—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监测研究。E-mail:zhengdj@hhu.edu.cn

为深入分析升船机变形的影响因素,本文提出了一种基于分位数回归的升船机变形监控模型构建方法。该方法从升船机的变形特点出发,用自适应弹性网络分位数回归方法构建回归模型,而后从中选出最优模型,并在工程实例应用中取得了较好的预测结果。

## 1 基本理论

### 1.1 分位数回归

分位数回归由 Koenker 等<sup>[10]</sup>于 1978 年首次提出,其与传统的均值回归仅考察自变量和因变量均值之间的关系不同,分位数回归更关心因变量在不同分位数下与自变量的回归关系,更有利于挖掘数据蕴含的信息。同时,建模时分位数回归无须考虑随机误差的分布形式,稳健性强,适用范围广。

对于简单多元线性模型,分位数回归表达式与均值回归相同:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (1)$$

其中

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$$

$$X_i = (1, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T$$

$$\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)^T$$

式中:  $Y$  为观测样本中的被解释变量;  $X$  为观测样本中的解释变量,是  $n \times (p+1)$  维矩阵;  $\beta$  为解释变量的系数向量,其中  $\beta_0$  为截距系数;  $\varepsilon$  为随机误差。

对于线性模型,分位数回归可被视作条件分位数函数,可表示为

$$Q_Y(\tau | X) = X\beta(\tau) \quad (2)$$

其中  $\beta(\tau) = (\beta_0(\tau), \beta_1(\tau), \beta_2(\tau), \dots, \beta_p(\tau))^T$

式中:  $\tau$  为分位数,  $\tau \in (0, 1)$ ;  $Q_Y(\tau | X)$  为  $X$  条件时  $Y$  的  $\tau$  分位数下的条件分位数函数;  $\beta(\tau)$  为  $\tau$  分位数下的系数向量,其中  $\beta_0(\tau)$  为  $\tau$  分位数下的截距系数。

与最小二乘回归的损失函数不同,分位数回归将加权误差绝对值之和定义为损失函数,并通过最小化损失函数估计回归系数,表达式为

$$\hat{\beta}(\tau) = \arg \min_{\beta(\tau)} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - X_i^T \beta(\tau)) \quad (3)$$

式中  $\rho_{\tau}(\cdot)$  为检查函数,表达式为

$$\rho_{\tau}(u) = (\tau - I(u < 0))u \quad (4)$$

式中:  $I(t)$  为示性函数,  $t$  为真时,  $I(t) = 1$ ;  $t$  为假时,  $I(t) = 0$ 。

### 1.2 自适应弹性网络分位数回归参数估计

在弱正则条件下,自适应弹性网络具备 Oracle 性质,在仿真试验中比其他惩罚项(如自适应

Lasso)表现更优<sup>[11]</sup>。同时,自适应弹性网络包含 L2 正则项,可以一定程度上消除变量间的多重线性相关性,从而增强模型的可解释性。因此,本文选择自适应弹性网络与分位数回归结合来处理升船机变形影响因子的选择问题。

自适应弹性网络在弹性网络的 L1 正则项中加入权重,其与分位数回归结合后的参数估计表达式为

$$\hat{\beta}(\tau)_{\text{AEN}} = \arg \min_{\beta(\tau)} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(y_i - X_i^T \beta(\tau)) + \lambda_1 \sum_{j=1}^p w_j |\beta_j(\tau)| + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j(\tau)^2 \quad (5)$$

其中  $w_j = \left( \left| \hat{\beta}_j(\tau)_{\text{EN}} + \frac{1}{n} \right| \right)^{\gamma}$

式中:  $\lambda_1$  为 L1 正则项的系数;  $\lambda_2$  为 L2 正则项的系数;  $w_j$  为权重;  $\gamma$  为正常数,根据文献[11-12]取 1;  $\hat{\beta}_j(\tau)_{\text{EN}}$  为用弹性网络分位数回归得到的初始值<sup>[12]</sup>。

分位数回归的损失函数具有非光滑性,给数学计算带来了巨大的挑战,故考虑到计算效率等因素,选择 Gu 等<sup>[12]</sup>于 2018 年提出的 scdADMM 算法对自适应弹性网络分位数回归模型进行参数估计。

## 2 监控模型构建方法

### 2.1 升船机变形候选影响因子集

研究水工建筑物的长期变形时,主要考虑水荷载、温度荷载和时效作用的影响<sup>[1]</sup>,故本文从这 3 类影响因子出发去探讨影响升船机变形的因素,从而为升船机变形监控模型构建候选影响因子集。

#### 2.1.1 水压分量

大坝变形监控模型通常以上下游水位的前  $q$  次方项为水荷载因子。对于升船机,其上闸首为拦河坝的一部分,上游水荷载会通过坝体传递给升船机,所以可将上游水位的前 3 次方项(重力坝)或前 4 次方项(拱坝)以及下游水位前 3 次方项引入候选因子集合。

升船机与混凝土坝体结构不同,升船机顺河向长度远大于坝体,升船机塔楼这一主体承重建筑通常在上工作门段之后,故坝体传递给升船机塔楼的上游水压荷载可能存在滞后效应,故可将前期上游水位平均值引入候选因子集合,时间范围保守选择在 30 d 以内。

综上,引入候选因子集合的水压分量因子如下:  $\delta_w = \{H_u, H_u^2, \dots, H_u^q, H_d, H_d^2, H_d^3, \bar{H}_{1-3}, \dots, \bar{H}_{m-n}\}$  (6) 式中:  $H_u$  为上游水位,重力坝时  $q=3$ ,拱坝时  $q=4$ ;  $H_d$  为下游水位;  $\bar{H}_{m-n}$  为观测日前第  $m$  天至第  $n$  天上游水位均值,  $m$  和  $n$  可根据实际工程情况调整。



### 2.1.2 温度分量

温度荷载是影响升船机塔楼变形的的主要荷载之一,其变形主要与温度有关,具有明显的年周期性<sup>[13-14]</sup>。水工建筑物变形监控模型中,一般以两组谐波因子表示具有明显周期变化规律的温度因子,它们有明确的物理意义,故对于升船机塔楼,可用两组谐波因子作为周期性温度因子。

气温并非是一个严格的周期函数,它会受到许多随机因素影响而表现出随机性<sup>[15]</sup>。升船机塔楼温度变形的有限元仿真<sup>[16]</sup>表明,短期气温变化会对升船机变形造成影响,如寒潮等。因此,考虑到升船机为高耸薄壁结构,温度场易受气温影响,故本文引入“随机气温因子”以考察其是否会对升船机变形带来影响。对于“随机气温因子”,王建等<sup>[15]</sup>已给出了一个合理的定义与计算方法,并用实例验证了可行性。

一天内气温不可避免地会出现上升下降现象,这种现象也是一个潜在的温度影响因子。根据自然规律,一天中通常 6:00 气温最低,14:00 气温最高,故定义日变温作为一个温度因子,即当监测时刻  $6:00 < t' \leq 14:00$  时,日变温为  $T_{t'} - T_6$ ; 当  $14:00 < t' \leq 6:00$  时,日变温为  $T_{t'} - T_{14}$ ,注意此时的 6:00 指第 2 天 6:00。

综上,引入候选因子集合的温度分量因子如下:

$$\delta = \left\{ \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365}, \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365}, T_{r,t}, T_{r,t-1}, \dots, T_{r,t-k}, T_d \right\} \quad (7)$$

式中: $t$  为监测日距始测日天数,因升船机建成时间一般要晚于大坝等建筑物,故本文将始测日定为升船机验收当日; $t_0$  为建模系列第一个监测日距始测日天数; $i=1,2$ ;  $T_{r,t}, T_{r,t-1}, \dots, T_{r,t-k}$  为随机气温因子,具体计算公式见文献<sup>[15]</sup>;  $k$  为滞后天数;  $T_d$  为日变温,每日 6:00 的气温减去前一天 14:00 的气温。

### 2.1.3 时效分量

同大坝等水工建筑物一样,升船机时效分量的组成成分复杂,是一个可以综合反映升船机钢筋混凝土徐变、基岩变形等因素的综合性影响因子。故升船机变形的时效因子同样可采用多项式形式和对数函数形式表达。引入候选因子集合的时效分量因子如下:

$$\delta_\theta = \{ \theta - \theta_0, \ln \theta - \ln \theta_0 \} \quad (8)$$

式中: $\theta$  为  $t$  除以 100;  $\theta_0$  为  $t_0$  除以 100。

## 2.2 模型优选方法

模型优选指从一系列关注局部信息的分位数回归模型中,选出一个最能代表整体信息的模型作为预测模型。黄耀英等<sup>[7]</sup>给出了最佳统计模型优选

原则:拟合的良好性、模型的简单性和检验的有效性。本文每个回归模型的影响因子均是经过自适应弹性网络筛选得到,已具备稀疏性,并且具有一定的物理意义,所以本文优选模型时只需服从拟合的良好性和检验的有效性这 2 个原则即可。

模型在训练集上的拟合良好性或在验证集上的有效性均可通过决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对误差 (MAE) 进行综合评价。对于分位数回归,还可用伪决定系数 (pseudo R-squared, PR2) 作为评价指标,PR2 计算方法可参考文献<sup>[17]</sup>。

以某一测点为例,测点的评价指标共计 8 个,需对它们进行归一化处理使其在同一量级。归一化前,需剔除  $R^2$ 、PR2 指标异常(即值小于 0.5)的模型。值越大越优的指标用式(9)归一化,值越小越优的指标用式(10)归一化。

$$\check{f}_j = \frac{f_j - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (9)$$

$$\check{f}_j = \frac{f_{\max} - f_j}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (10)$$

式中: $f_j$  为各分位数下的某一评价指标; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  分别为  $f_j$  的最小和最大值。

归一化后的指标无须再进行标准化处理,因为上述归一化处理已相当于经公式  $y=x$  进行了标准化,避免了文献<sup>[7]</sup>中评价指标的高值或低值在标准化后区分度不明显的问题。

回归模型的最终评价标准为

$$M_{\text{final}} = \sum_{c=1}^4 \lambda_c F_c + \sum_{d=1}^4 \mu_d V_d \quad (11)$$

式中: $F_1, F_2, F_3, F_4$  分别为训练集上某分位数模型归一化后的  $R^2$ 、PR2、RMSE 和 MAE;  $V_1, V_2, V_3, V_4$  分别为验证集上某分位数模型归一化后的  $R^2$ 、PR2、RMSE 和 MAE;  $\lambda_c, \mu_d$  分别为相应权重,本文均取 1/8。

计算得到各回归模型的  $M_{\text{final}}$  后,选择  $M_{\text{final}}$  最大的模型为该测点最优模型。

## 2.3 模型构建流程

以单个测点为例,基于分位数回归的升船机变形预测模型建模流程可总结为如下 5 个步骤:

**步骤 1** 将变形监测数据与候选影响因子监测数据划分为训练集、验证集和测试集,并进行归一化处理。

**步骤 2** 确定所需的分位数,以某一分位数为例,将训练集输入弹性网络分位数回归模型,并在固定 L2 正则项系数  $\lambda_2$  后<sup>[18]</sup>,用  $k$  折交叉验证法搜索最优的 L1 正则化系数  $\lambda_1$ ,得到该分位数下自适应弹性网络分位数回归模型的权重。

**步骤3** 同样以某一分位数为例,将训练集输入自适应弹性网络分位数回归模型,令L2正则项系数 $\lambda_2$ 与该分位数在步骤2中的 $\lambda_2$ 值一致,并用 $k$ 折交叉验证法搜索最优的L1正则化系数 $\lambda_1$ ,以此类推,就能得到各分位数下的自适应弹性网络分位数回归数学模型以及变量筛选结果。

**步骤4** 计算各回归模型在训练集和验证集上的评价指标,并将所得评价指标输入模型优选方法,最终确定该测点的最优模型。

**步骤5** 在测试集上考察最终模型的预测结果,验证本文所提方法的合理性和可行性。

### 3 模型验证

#### 3.1 工程概况

某水利工程拦河坝为混凝土重力坝,升船机为全平衡钢丝绳卷扬式垂直升船机。升船机主要建筑物塔楼为高耸薄壁结构,由8座钢筋混凝土承重塔柱和2座交通楼构成,并在塔楼的中心线左右两侧呈对称布置。为监测升船机水平位移变化情况,共计布置了10条正垂线,分别布置在升船机塔楼的下平衡段、交通段中部、下提升段E形结构等部位,共计20个测点,可同时监测升船机塔楼上下游方向(顺河向)和左右岸方向(横河向)的水平位移。

对数据的可靠性和完整性进行分析后,选择升船机塔楼的左右岸方向绝对水平位移的13个测点进行建模。建模序列为2018年1月4日至2020年12月31日,共计1093个测值,监测时间为每天6:00,其中训练集为前800个测值,验证集为序列中的第801~900个测值,测试集则为后193个测值。

#### 3.2 候选影响因子组成

候选影响因子集合共包含20个影响因子,并按如上顺序将因子分别编号为1~20。

##### a. 水荷载因子集为

$$\delta_{1-10} = \{H_u, H_u^2, H_u^3, H_d, H_d^2, H_d^3, \bar{H}_{1-4}, \bar{H}_{5-9}, \bar{H}_{10-15}, \bar{H}_{16-30}\} \quad (12)$$

##### b. 温度因子集为

$$\delta_{11-18} = \left\{ \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365}, \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365}, T_{r,t}, T_{r,t-1}, \dots, T_{r,t-2}, T_d \right\} \quad (13)$$

##### c. 时效因子集为

$$\delta_{19-20} = \{\theta - \theta_0, \ln \theta - \ln \theta_0\} \quad (14)$$

为初步验证选择的合理性,在测点PL10-2与式(15)常规影响因子集做对比(图1)。由图1可知,本文候选影响因子集极大改善了常规影响因子集的拟合效果,较好地拟合了实测值全局与局部变

化趋势,常规影响因子集则拟合不出实测值局部的波动情况。

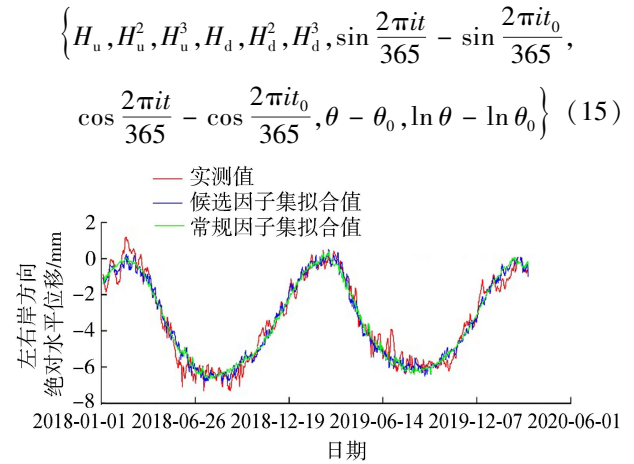


图1 测点 PL10-2 测值拟合结果对比

#### 3.3 影响因子筛选结果与分析

以0.1为间隔,取0.1~0.9共计9个分位数分析不同分位数下测点影响因子系数的变化规律。以测点PL10-2为例,筛选后的主要影响因子系数变化如图2所示。

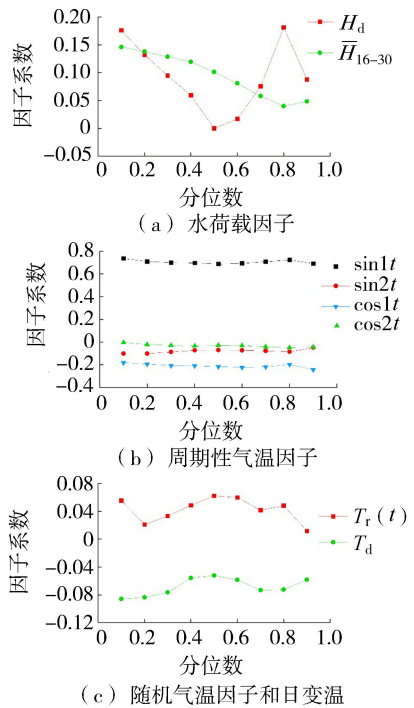


图2 测点 PL10-2 影响因子系数变化情况

由图2可知,下游水位( $H_d$ )的系数随分位数增大呈先减小后增大的趋势,即对变形影响先减小后增大;前期上游水位均值( $\bar{H}_{16-30}$ )的系数随分位数增大呈先减小趋势,说明位移越大其影响越小;4个周期温度因子(两组谐波因子)的系数随分位数变化不断调整,说明对于不同变形大小,周期性规律略有差异;随机气温因子( $T_{r,t}$ )的系数变化有一定波动性;日变温( $T_d$ )的系数为负并随分位数增大呈先增

大后减小趋势,说明其在变形值较大或较小时影响增大。除图2中的影响因子外,在个别分位数下,上游水位前期平均值( $\bar{H}_{1-4}$ ,  $\bar{H}_{5-9}$ )、时效因子( $\theta-\theta_0$ )也被选中,可称其为次要因子。这可能是因为它们仅在某些变形分位数下才会对变形产生一些影响。可以看出,分位数回归可以分析升船机变形在不同分位数时的因子作用情况,与均值回归相比能得到更多信息。

以各测点不同分位数下共117个回归模型的影响因子被选情况为依据,采用被选百分比为指标,可得到以下规律:

a. 候选影响因子除水位次方项( $H_u^2, H_u^3, H_d^2, H_d^3$ )以外的影响因子均会不同程度影响变形。对于全部测点,这些因子可以被分为必要因子(大于70%)、次要因子(30%~70%)和非必要因子(小于30%)。

b. 必要因子定义为各测点各分位数下被选中频率较高的因子,包括周期温度因子(两组谐波因子)、随机气温因子( $T_{r,t}, T_{r,t-2}$ )、观测日前第16—30天上游水位均值( $\bar{H}_{16-30}$ ),它们对升船机变形中起到了主要影响作用。

c. 次要因子定义为仅在某些测点变形中发挥了较大作用,包括随机气温因子( $T_{r,t-1}$ )、前期上游水位均值( $\bar{H}_{1-4}, \bar{H}_{5-9}, \bar{H}_{10-15}$ )和时效因子( $\theta-\theta_0$ )。

d. 非必要因子指仅在一个测点或某些测点的某几个分位数下有作用,且作用较小,包括上下游水位因子( $H_u, H_d$ )、日变温( $T_d$ )、时效因子( $\ln\theta-\ln\theta_0$ )。

e. 对13个测点模型中水荷载因子、温度因子和时效因子对变形影响大小定量分析,可得温度因子为影响升船机变形的主要因素,水荷载因子次之,时效因子影响则最小。

### 3.4 最优模型及验证

以训练集为例,各测点各分位数下回归方程的 $R^2$ 、PR2、RMSE和MAE如图3所示,大多数测点的回归方程拟合效果较好,并以0.5、0.6分位数时的回归模型拟合效果最佳。所有测点的 $R^2$ 均随分位数增大呈先增大后减小的变化趋势;PR2随分位数增大,变化趋势与 $R^2$ 类似;所有测点的RMSE和MAE则随分位数增大呈先减小后增大的变化趋势。

实际水利工程的定检工作中,逐步回归法使用较多,这表明其能经受实际工程考验,有一定的实用性和说服力,故本文选择逐步回归模型与最优模型在测试集上进行对比,结果见表1,其中最优模型选择结果以分位数表示。

由表1可知,对于大部分测点,最优模型的 $R^2$ 、RMSE和MAE均要优于逐步回归模型,对于逐步回

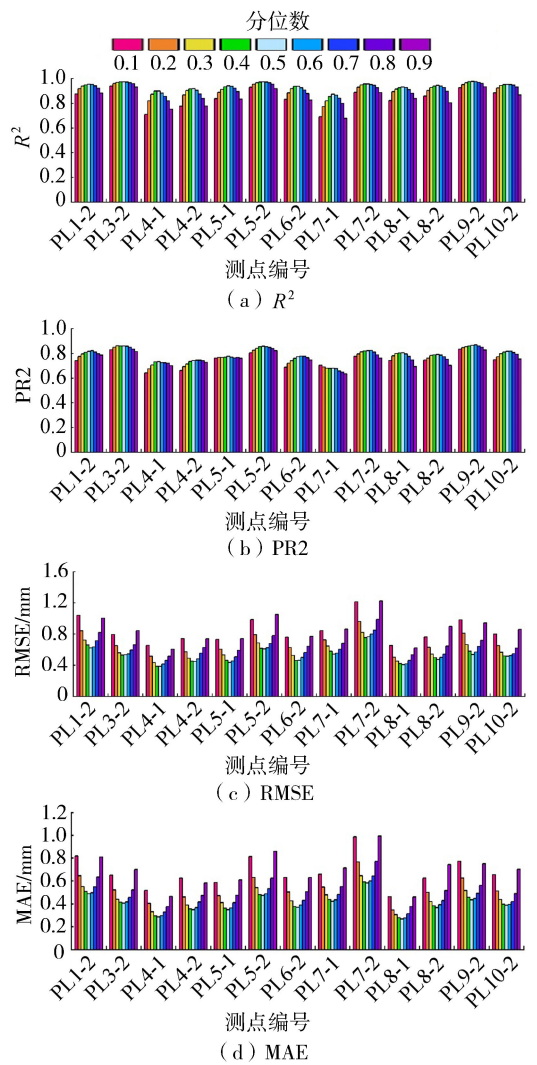


图3 训练集上各回归模型评价指标

表1 模型评价指标对比

测点 编号	最优模型评价指标				逐步回归模型评价指标		
	分位数	$R^2$	RMSE/ mm	MAE/ mm	$R^2$	RMSE/ mm	MAE/ mm
PL1-2	0.5	0.796	0.852	0.751	0.355	1.5164	1.403
PL3-2	0.5	0.958	0.501	0.424	0.960	0.488	0.373
PL4-1	0.2	0.815	0.228	0.187	0.593	0.339	0.270
PL4-2	0.5	0.699	0.409	0.326	-0.676	0.966	0.891
PL5-1	0.8	0.749	0.494	0.393	-2.377	1.814	1.779
PL5-2	0.6	0.952	0.576	0.474	0.515	1.823	1.735
PL6-2	0.5	0.710	0.519	0.428	0.745	0.487	0.377
PL7-1	0.6	0.703	0.506	0.382	0.550	0.623	0.458
PL7-2	0.6	0.936	0.653	0.543	0.924	0.708	0.553
PL8-1	0.6	0.891	0.371	0.268	0.834	0.459	0.365
PL8-2	0.6	0.740	0.725	0.612	0.773	0.677	0.563
PL9-2	0.6	0.904	0.997	0.773	0.920	0.909	0.719
PL10-2	0.6	0.731	0.830	0.743	0.878	0.559	0.449

归模型表现异常的测点,最优模型也具有相对较好的表现;对于少部分测点,最优模型的评价指标比逐步回归模型要差,但差异不大;整体上,最优模型的预测精度波动性小,具有较强的稳定性。同时,本例中测试集与验证集数据长度之和为293 d,时长已接

近 1a,这从侧面显示出本文所提的最优模型具有良好的长期预测能力。由表 1 还可以发现最优模型以 0.5、0.6 分位数居多,这表明对于升船机的大部分测点,0.5、0.6 分位数回归模型更具有代表性。

## 4 结 论

a. 影响升船机左右岸方向绝对水平位移的主要因素是温度和上游水位前期平均值,上下游水位次方项对其影响很小。

b. 分位数回归比均值回归更适合挖掘监测资料中所蕴含的信息,最优模型与逐步回归模型相比,在具有同样简单的数学模型的同时,对测试集的预测效果要更好,稳定性强。

c. 对于大部分测点,0.5、0.6 分位数回归模型可较好地代表变形与影响因子间的关系。

## 参考文献:

[ 1 ] 徐卫亚,徐伟,闫龙,等.基于 LMBP 和 SVR 的倾倒变形体变形预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):64-69. (XU Weiya, XU Wei, YAN Long, et al. Deformation prediction of toppling deformed slope based on LMBP and SVR[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):64-69. (in Chinese))

[ 2 ] 钮新强.三峡升船机结构关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.

[ 3 ] 胡亚安,李中华,李云,等.中国大型升船机研究进展[J]. 水运工程,2016(12):10-19. (HU Yaan, LI Zhonghua, LI Yun, et al. Research developments in the field of major ship lift in China [J]. Port & Waterway Engineering,2016(12):10-19. (in Chinese))

[ 4 ] 卢骏,戴吾蛟,章浙涛.大坝变形变系数回归建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2015,40(1):139-142. (LU Jun, DAI Wujiao, ZHANG Zhetao. Modeling dam deformation using varying coefficient regression [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(1):139-142. (in Chinese))

[ 5 ] 侯回位,郑东健,刘永涛,等.基于 EEMD-SE-LSTM 的混凝土坝变形监测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):61-66. (HOU Huiwei, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. Deformation monitoring model of concrete dams based on EEMD-SE-LSTM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):61-66. (in Chinese))

[ 6 ] 裴耀.分位数回归及其应用[D]. 武汉:华中师范大学,2014.

[ 7 ] 黄耀英,何一洋,沈振中,等.大坝监测最佳统计模型优选方法[J]. 水利学报,2022,53(2):154-164. (HUANG Yaoying, HE Yiyang, SHEN Zhenzhong, et al.

Optimization method of optimal statistical model of dam monitoring data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(2):154-164. (in Chinese))

[ 8 ] MELIGKOTSIDOU L, VRONTOS I D, VRONTOS S D. Quantile regression analysis of hedge fund strategies[J]. Journal of Empirical Finance,2009,16(2):264-279.

[ 9 ] 李娟,闫磊,屈春来,等.分位数回归和 GAMLSS 模型在非一致性洪水频率分析中的比较[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):48-54. (LI Jing, YAN Lei, QU Chunlai, et al. Comparison of quantile regression and GAMLSS model in non-stationary flood frequency analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(5):48-54. (in Chinese))

[ 10 ] KOENKER R, BASSETT G. Regression quantiles [J]. Econometrica,1978,46(1):33-50.

[ 11 ] ZOU H,ZHANG H H. On the adaptive elastic-net with a diverging number of parameters[J]. Annals of Statistics, 2009,37(4):1733-1751.

[ 12 ] GU Y,FAN J,KONG L,et al. ADMM for high-dimensional sparse penalized quantile regression [J]. Technometrics, 2018,60(3):319-331.

[ 13 ] 朱艳华.水口水电站升船机塔楼变形分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(3):124-126. (ZHU Yanhua. Analysis of deformation behavior of ship lift tower in Shuikou Hydropower Station [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010,8(3):124-126. (in Chinese))

[ 14 ] 邱章云,罗琛.三峡升船机塔柱施工期变形监测[J]. 中国工程科学,2013,15(9):102-107. (QIU Zhangyun, LUO Chen. Deformation monitoring on Three Gorges Project ship lift tower during construction period [J]. Strategic Study of CAE, 2013,15(9):102-107. (in Chinese))

[ 15 ] 王建,郑东健,姜海霞.大坝观测资料分析中谐波温度因子的改进及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):68-72. (WANG Jian, ZHENG Dongjian, JIANG Haixia. Improvement of harmonic wave temperature factor and its application to analysis of dam monitoring data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002,30(1):68-72. (in Chinese))

[ 16 ] 王旭虹,朱虹,汪基伟.三峡升船机塔柱结构温度变形计算[J]. 工程力学,2001(增刊1):931-935.

[ 17 ] KOENKER R, MACHADO J. Goodness of fit and related inference processes for quantile regression [J]. Journal of the American Statistical Association, 1999,94(448):1296-1310.

[ 18 ] 徐若南.基于自适应弹性网对强相关数据的群组变量选择的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

(收稿日期:2022-04-13 编辑:刘晓艳)

# 后峰型降雨条件下地基瞬态极限承载力解析解

秦卫星<sup>1,2</sup>, 邓传雄<sup>1,2</sup>, 胡惠仁<sup>3</sup>, 熊轩宇<sup>1,2</sup>, 刘泽辰<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**为快速获得后峰型降雨入渗过程非饱和地基承载性能演化规律,在Richards非饱和渗流控制方程中引入Gardner渗透系数函数和土-水特征曲线模型,推导了后峰型降雨入渗过程地基瞬态基质吸力解析解,并利用有限元模拟结果对解析解进行验证;基于瞬态基质吸力解析解,推导了考虑基质吸力影响的后峰型降雨过程地基瞬态极限承载力解析解,建立了非饱和地基极限承载力和起始雨强、雨强变化系数以及降雨历时之间的映射关系;基于地基瞬态极限承载力解析解,研究了后峰型降雨入渗过程地基承载性能演化特性,分析了起始雨强和雨强变化系数变化对地基承载性能的影响。结果表明:遭遇后峰型降雨入渗时,地基极限承载力随降雨历时增加而逐渐降低,降低速率呈现先慢后快的非线性特点,不同于遭遇均匀型降雨时地基极限承载力近线性减小的特点;雨强变化系数一定时,起始雨强越大,地基承载性能降低越快;起始雨强一定时,雨强变化系数越大,地基承载性能降低越快。

**关键词:**非饱和地基;极限承载力;基质吸力;后峰型降雨;解析解

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0033-06

**Analytical solution of transient ultimate bearing capacity for foundation under delayed-peak pattern rainfall infiltration**//QIN Weixing<sup>1,2</sup>, DENG Chuanxiong<sup>1,2</sup>, HU Huiran<sup>3</sup>, XIONG Xuanyu<sup>1,2</sup>, LIU Zechen<sup>1,2</sup> (1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To reveal the influence of delayed-peak rainfall infiltration on ultimate bearing capacity of an unsaturated foundation rapidly, the following research work was carried out. The Gardner's permeability coefficient function and the soil-water characteristic curve model were introduced to simplify the Richards unsaturated seepage control equation, and the Laplace transform was adopted to derive the transient analytical solution of matrix suction for foundation under delayed-peak rainfall infiltration with rain intensity, which was verified with the finite element numerical simulation results. Based on the theory of shear strength for unsaturated soil and the transient analytical solution of matrix suction, the expression of transient ultimate bearing capacity for foundation was obtained under delayed-peak rainfall infiltration. The mapping relationship between the ultimate bearing capacity and the initial rain intensity, the rain intensity variation coefficient, and the rainfall duration was established. With the analytic solution of the ultimate bearing capacity, the evolution characteristics of the bearing capacity for foundation were studied during the delayed-peak rainfall, and the effects of the initial rain intensity and the rain intensity coefficient on the ultimate bearing capacity for foundation were analyzed. The results show that during delayed-peak rainfall infiltration, the ultimate bearing capacity decreases gradually with a nonlinear velocity from low to high, which is different from the near linear reduction when encountering uniform rainfall. When the rain intensity coefficient is constant, ultimate bearing capacity for foundation decreases faster with the greater initial rain intensity. When the initial rain intensity is constant, the ultimate bearing capacity for foundation decreases faster with greater rain intensity variation coefficient.

**Key words:** unsaturated soil foundation; ultimate bearing capacity; matrix suction; delayed-peak rainfall; analytical solution

**基金项目:**国家自然科学基金(51208062,51508039);湖南省自然科学基金(2022JJ30601);湖南省交通科技计划(201140);湖南省研究生科研创新项目(CX20190680)

**作者简介:**秦卫星(1978—),男,副教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:qinweixing@csust.edu.cn

雨水入渗会改变非饱和地基浅表层土体基质吸力,影响地基承载性能,进而诱发建筑物失稳破坏<sup>[1-3]</sup>。因此快速准确预测降雨入渗过程地基基质吸力和承载性能演变特性,对雨季地基承载性能评价和及时采取针对性措施防止地基破坏具有重大现实意义。

解析解因简单、直观、高效等优点在非饱和地基承载特性研究中被广泛采用。Vanapalli 等<sup>[1]</sup>考虑了基底 1.5 倍基础宽度范围内的基质吸力影响,建立了非饱和地基极限承载力计算公式。张常光等<sup>[4]</sup>推导了基质吸力均匀、线性分布时非饱和条形地基极限承载力表达式。赵炼恒等<sup>[5]</sup>根据 Fredlund 非饱和抗剪强度理论,分别给出了基质吸力沿深度均匀、线性分布时非饱和土条形基础竖向极限承载力计算的上限法。Vahedifard 等<sup>[6]</sup>引入均匀型降雨稳定入渗条件下基质吸力解析解,建立了非饱和土地基极限承载力计算公式。陈茜等<sup>[7]</sup>基于恒定雨强稳定入渗时基质吸力解析解获得了非饱和土地基极限承载力表达式。由此可见,目前非饱和地基承载力解析解研究已取得较丰硕成果,但现有成果多以基质吸力分布状态已知或假定雨水以恒定均匀雨强稳定入渗为基础,鲜见前峰、中峰、后峰等非均匀型降雨入渗过程地基瞬态极限承载力解析解研究的报道。

本文以后峰型降雨为例,基于 Richards 非饱和渗流控制方程,采用 Gardner 渗透系数函数和土-水特征曲线模型,推导了后峰型降雨入渗过程地基瞬态基质吸力解析解和考虑基质吸力影响的后峰型降雨过程地基瞬态极限承载力解析解,建立了非饱和地基极限承载力和起始雨强、雨强变化系数以及降雨历时之间的映射关系;研究了后峰型降雨入渗过程地基承载性能演化特性,并分析了起始雨强和雨强变化系数变化对地基承载性能的影响。

## 1 地基基质吸力解析解

### 1.1 基本假定

参照文献[3,8],引入如下基本假定描述非饱和地基水文地质特征:①地基土体均质且各向同性,雨水入渗过程土体孔隙保持不变;②地下水位距地基表面较远,雨水入渗过程水位保持不变。后峰型降雨以瞬时雨强  $q_B$  入渗地基:

$$q_B = q_0 + at \quad (1)$$

式中: $q_0$ 为起始雨强,cm/h; $a$ 为雨强变化系数,大于零,cm/h<sup>2</sup>; $t$ 为降雨历时,h。

基于上述假定和降雨入渗边界条件,绘制后峰型降雨入渗作用下均匀地基基质吸力计算示意图如

图 1 所示。

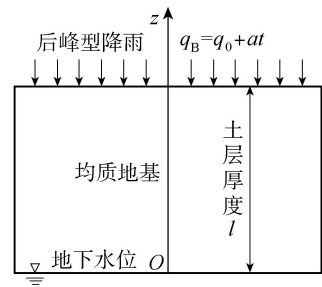


图 1 地基基质吸力计算示意图

### 1.2 控制方程及方程化简

建立混合格式的非饱和渗流控制方程<sup>[8-12]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ k \left( \frac{\partial h_m}{\partial z} + 1 \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

其中  $k = k_s e^{\beta h_m}$   $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\beta h_m}$   
式中: $k$ 为非饱和土体渗透系数,cm/h; $z$ 为研究点相对地下水位距离,地表处为  $l$ ,cm; $h_m$ 为  $z$ 处基质吸力,cm; $\theta$ 为体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $k_s$ 为饱和渗透系数,cm/h; $\beta$ 为去饱和系数,cm<sup>-1</sup>; $\theta_r$ 为残余体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>; $\theta_s$ 为饱和体积含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

引入无量纲值  $Z = \beta z$ 、 $L = \beta l$ 、 $K = \frac{k}{k_s}$ 、 $T = \frac{\beta k_s t}{\theta_s - \theta_r}$ ,控制方程(2)可简化为

$$\frac{\partial^2 K}{\partial Z^2} + \frac{\partial K}{\partial Z} = \frac{\partial K}{\partial T} \quad (3)$$

### 1.3 初始和边界条件

采用前期均匀型降雨雨强  $q_A$  入渗地表形成的稳定渗流场作为初始条件,由无量纲值表示为

$$K(Z, 0) = Q_A - (Q_A - e^{\beta h_0}) e^{-Z} \quad (4)$$

其中

$$Q_A = q_A / k_s$$

降雨入渗的任意时刻,地地下水水位处  $Z=0$  基质吸力  $h_0$  保持不变,则有:

$$K(0, T) = e^{\beta h_0} \quad (5)$$

后期降雨过程,地表处  $Z=L$  入渗流量为后峰型降雨雨强  $q_B = q_0 + at$ ,则有:

$$\left( \frac{\partial K}{\partial Z} + K \right)_{Z=L} = Q_B \quad (6)$$

其中

$$Q_B = \frac{q_0 + at}{k_s} = Q_0 + AT$$

$$A = \frac{(\theta_s - \theta_r) a}{\beta k_s}$$

### 1.4 解析解推导

结合式(4)~(6)所示的初始条件和边界条件,利用拉普拉斯正、逆变换对非饱和渗流控制方程(3)进行求解。

#### 1.4.1 拉普拉斯正变换

$$\text{令 } \bar{K} = \int_0^{+\infty} K e^{-sT} dT, s \text{ 为常数,将式(3)乘以 } e^{-sT}$$

并积分,得到拉普拉斯正变换后的控制方程以及相应初始条件和边界条件:

$$\frac{\partial^2 \bar{K}}{\partial Z^2} + \frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} = s\bar{K} - K(Z, 0) \quad (7)$$

$$\bar{K}(Z, 0) = \frac{K(Z, 0)}{s} \quad (8)$$

$$\bar{K}(0, T) = \frac{e^{\beta h_0}}{s} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{K}}{\partial Z} + \bar{K}\right)_{Z=L} = \frac{1}{s} \left(\frac{A}{s} + Q_0\right) \quad (10)$$

#### 1.4.2 求解非齐次线性微分方程

结合初始条件(8)和边界条件(9)(10),由非齐次线性微分方程(7)可得:

$$\bar{K} = \frac{K(Z, 0)}{s} + e^{\frac{1}{2}(L-Z)} [Ag(s) + (Q_0 - Q_A)f(s)] \quad (11)$$

其中

$$g(s) = \frac{1}{s^2} \frac{\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}Z\right]}{\frac{1}{2}\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}L\right] + \left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}\cosh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}L\right]}$$

$$f(s) = \frac{1}{s} \frac{\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}Z\right]}{\frac{1}{2}\sinh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}L\right] + \left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}\cosh\left[\left(\frac{1}{4}+s\right)\frac{1}{2}L\right]}$$

#### 1.4.3 拉普拉斯逆变换

利用留数定理对式(11)进行拉普拉斯逆变换消除参数  $s$ , 得到后峰型降雨入渗过程瞬态非饱和渗透系数解析解:

$$K = K(Z, 0) + e^{0.5(L-Z)} [AG(T) + (Q_0 - Q_A)F(T)] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad G(T) &= 2e^{-0.5L} Z \cosh(0.5Z) + \sinh(0.5Z) [2Te^{-0.5L} - 4e^{-L} \cosh(0.5L) - 2Le^{-0.5L}] + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \cos^2(\lambda_n L) \sin(\lambda_n Z) \sin(\lambda_n L) e^{(-\lambda_n^2 - 0.25)T}}{1 + 0.5L + 2\lambda_n^2 L} \\ F(T) &= e^{0.5(Z-L)} - e^{-0.5(Z+L)} + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{-4 \sin(\lambda_n Z) \sin(\lambda_n L) e^{(-\lambda_n^2 - 0.25)T}}{1 + 0.5L + 2\lambda_n^2 L} \end{aligned}$$

式中  $\lambda_n$  为特征方程  $\tan(\lambda_n L) + 2\lambda_n = 0$  的正根, 可采用 MATLAB 程序求解。

#### 1.4.4 基质吸力解析解

将式(12)中无量纲变量还原, 代入 Gardner<sup>[10]</sup> 提出的非饱和土体渗透系数函数  $k = k_s e^{\beta h_m}$ , 获得以压力形式表示的基质吸力解析解:

$$(u_a - u_w)_z = -\frac{1000}{\alpha} \ln \left[ \frac{q_A - \left[ q_A - k_s e^{-\frac{\alpha(u_a - u_w)_0}{1000}} \right] e^{-\frac{\alpha \gamma_w z}{100}}} {k_s} \right] +$$

$$e^{\frac{\alpha \gamma_w (l-z)}{200}} \left[ \frac{a}{k_s} G'(t) + \frac{(q_0 - q_A)}{k_s} F'(t) \right] \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad F'(t) &= e^{\frac{\alpha \gamma_w (l-z)}{200}} - e^{\frac{\alpha \gamma_w (l+z)}{200}} + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{-4 \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n z}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) e^{(-\lambda_n^2 - \frac{1}{4}) \frac{\alpha \gamma_w k_s t}{100(\theta_s - \theta_r)}}}{1 + \frac{\alpha \gamma_w l}{200} + \frac{2\alpha \gamma_w \lambda_n^2 l}{100}} \\ G'(t) &= 2e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} \frac{\alpha \gamma_w z}{100} \cosh\left(\frac{\alpha \gamma_w z}{200}\right) + \\ &\sinh\left(\frac{\alpha \gamma_w z}{200}\right) \left[ 2Te^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} - 4e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{100}} \cosh\left(\frac{\alpha \gamma_w l}{200}\right) - \frac{\alpha \gamma_w l}{50} e^{-\frac{\alpha \gamma_w l}{200}} \right] + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{16 \cos^2\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n z}{100}\right) \sin\left(\frac{\alpha \gamma_w \lambda_n l}{100}\right) e^{(-\lambda_n^2 - \frac{1}{4}) \frac{\alpha \gamma_w k_s t}{100(\theta_s - \theta_r)}}}{1 + \frac{\alpha \gamma_w l}{200} + \frac{\alpha \gamma_w \lambda_n^2 l}{50}} \end{aligned}$$

式中:  $u_a$  为孔隙气压力, kPa;  $u_w$  为孔隙水压力, kPa;  $\alpha$  为压力形式表示的去饱和系数, 表达式为  $100\beta/\gamma_w$ , kPa<sup>-1</sup>;  $\gamma_w$  为水的容重, 10 kN/m<sup>3</sup>。

#### 1.5 解析解验证

某均质地基地表相对地下水位距离  $l = 5$  m, 土体相关参数如下: 饱和渗透系数  $k_s = 0.36$  cm/h、去饱和系数  $\alpha = 0.0165$  kPa<sup>-1</sup>、进气值  $(u_a - u_w)_a = 26.32$  kPa、储水量  $\theta_s - \theta_r = 0.27$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>、残余含水量  $\theta_r = 0.20$  cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>、容重  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>、有效黏聚力  $c' = 18$  kPa、有效内摩擦角  $\varphi' = 16^\circ$ 。该地基遭遇降雨历时 12 h、总降雨量为 48 mm 的后峰型降雨, 起始雨强  $q_0$  为 0.1 cm/h, 雨强变化系数  $a$  为 0.05 cm/h<sup>2</sup>。在这场后峰型降雨之前, 该地基所在区域长时间没发生降雨, 因而前期雨强  $q_A$  可取为 0 cm/h。

分别利用有限元软件 Geo-Studio 的渗流分析模块 SEEP/W 和式(13)所示基质吸力解析解, 研究后峰型降雨入渗过程该地基基质吸力演化过程, 如图 2 所示。

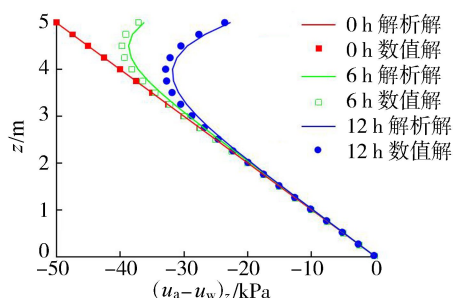


图 2 地基基质吸力解析解和有限元数值解

由图 2 可知, 降雨过程中地基基质吸力沿深度分布迅速由初始的线性分布变为非线性分布; 地基中上部基质吸力大小随时间推移不断减小, 其减小幅度及影响区域深度不断增加。同时可以发现 2 种

方法求解的雨水入渗过程地基基质吸力大小和变化规律几乎一致,表明推求的后峰型降雨过程地基基质吸力解析解是正确的。

## 2 地基极限承载力解析解

非饱和土抗剪强度理论中,常将基质吸力产生的吸附强度  $c_s$  视为一种特殊黏聚力:

$$c_s = (u_a - u_w)_a (1 - S_e) \tan \varphi' + (u_a - u_w)_z S_e \tan \varphi' \quad (14)$$

其中  $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$

式中  $S_e$  为有效饱和度。

在计算非饱和地基极限承载力时,以  $c_s$  考虑基质吸力对非饱和地基承载性能的影响<sup>[1-2]</sup>。

a. 当地基基质吸力沿深度均匀分布时,宽为  $b$ 、埋深为  $d$  的基础极限承载力  $p_u$  的计算公式为

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma_1 b N_\gamma \xi_\gamma + \gamma_2 d N_q \xi_q + (c' + c_s) N_c \xi_c \quad (15)$$

式中:  $\gamma_1$  为基底以下土体容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\gamma_2$  为基底以上土体容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $N_\gamma$ 、 $N_q$ 、 $N_c$  分别为容重、荷载、黏聚力对应的承载力系数;  $\xi_\gamma$ 、 $\xi_q$ 、 $\xi_c$  分别为容重、荷载、黏聚力对应的形状系数,其求解可参照文献[11]。

b. 当基质吸力沿深度非线性分布时,参照文献[4,6]的做法,将基底中心下  $1.5b$  范围内应力球平均基质吸力产生的吸附强度  $c_s$  用于计算地基极限承载力。平均基质吸力确定方法如下:先以基础中心线与地下水位线交点为坐标原点,  $z$  轴铅直向上、 $x$  轴水平向右,建立如图3所示的坐标系;然后在基底以下  $1.5b$  范围内画应力球,该应力球范围内基质吸力分布曲线与坐标轴  $z$  围成图形形心  $o$  处的基质吸力值即为该应力球平均基质吸力。图3中所示阴影部分形心  $o$  的纵坐标  $z_o$  为

$$z_o = \frac{1}{A} \int_{l-d-1.5b}^{l-d} z (u_a - u_w)_z dz \quad (16)$$

式中  $A$  为阴影部分面积。

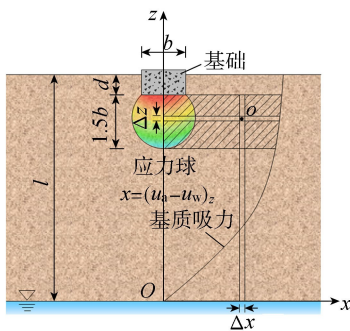


图3 地基平均基质吸力计算示意图

为考虑后峰型降雨入渗过程地基非线性分布基质吸力对地基极限承载力的影响,将式(16)代入

式(13)得到相应降雨时刻的平均基质吸力  $(u_a - u_w)_{z_o}$ ,根据式(14)计算平均基质吸力对应的吸附强度,进而得到降雨过程非饱和地基瞬态极限承载力  $p_u$  的计算公式:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma_1 b N_\gamma \xi_\gamma + \gamma_2 d N_q \xi_q + \{c' + (u_a - u_w)_a [1 - e^{-\alpha(u_a - u_w)_{z_o}}] \tan \varphi' + (u_a - u_w)_{z_o} e^{-\alpha(u_a - u_w)_{z_o}} \tan \varphi'\} N_c \xi_c \quad (17)$$

联立式(13)(16)(17),可以建立后峰型降雨入渗作用下地基瞬态极限承载力和起始雨强  $q_0$ 、雨强变化系数  $a$  以及降雨历时  $t$  之间的直接映射关系。此外,根据雨强变化系数  $a$  取值,建立的地基瞬态极限承载力解析解还适用于均匀型、前峰型降雨入渗情况。具体如下:当雨强变化系数  $a$  等于零时,入渗雨水转变为均匀型降雨,式(13)退化为文献[3]中均匀型雨水入渗作用下地基基质吸力解析解;当雨强变化系数  $a$  小于零时,为前峰型降雨,降雨强度随时间增加而减小,式(13)可用于计算前峰型雨水入渗下地基基质吸力。

## 3 参数影响分析

以第1.5节采用的非饱和地基为研究对象,计算示意图如图3所示。基础宽  $b=1\text{ m}$ 、长  $f=10\text{ m}$ 、埋深  $d=0\text{ m}$ ,基底完全粗糙。前期降雨强度  $q_A$  为  $0\text{ cm/h}$ ,初始时刻基质吸力沿地基深度线性分布。后期遭遇后峰型降雨,雨水直接以雨强值  $q_B = q_0 + at$  入渗地基表面,地下水位保持不变。

针对不同起始雨强  $q_0$  和雨强变化系数  $a$  的后峰型降雨,利用式(17)所示极限承载力解析解研究后峰型降雨入渗作用下地基极限承载力演化规律,探究起始雨强  $q_0$  和雨强变化系数  $a$  对地基极限承载力的影响。

### 3.1 起始雨强 $q_0$ 的影响

降雨历时  $t=24\text{ h}$ ,雨强变化系数  $a=0.02\text{ cm/h}^2$  保持不变,分别取起始雨强  $q_0=0.12\text{ cm/h}$ 、 $0.24\text{ cm/h}$ 、 $0.36\text{ cm/h}$ 、 $0.48\text{ cm/h}$  来研究起始雨强  $q_0$  对地基极限承载力的影响,结果如图4所示。

从图4(a)可以看出:降雨前地基极限承载力为  $414.6\text{ kPa}$ ;经历4种不同起始雨强的后峰型降雨历时  $24\text{ h}$  入渗后,地基极限承载力分别降低为  $380.6\text{ kPa}$ 、 $368.8\text{ kPa}$ 、 $357.1\text{ kPa}$  和  $346.3\text{ kPa}$ ,地基极限承载力随着雨水入渗以先慢后快的规律降低。这是因为后峰型降雨的初期入渗雨量小,基质吸力减小较慢,地基极限承载力缓慢降低;降雨中后期,入渗雨量逐渐增大,基质吸力快速减小,地基极限承载力加速降低。由图4(b)可知:地基极限承载力随



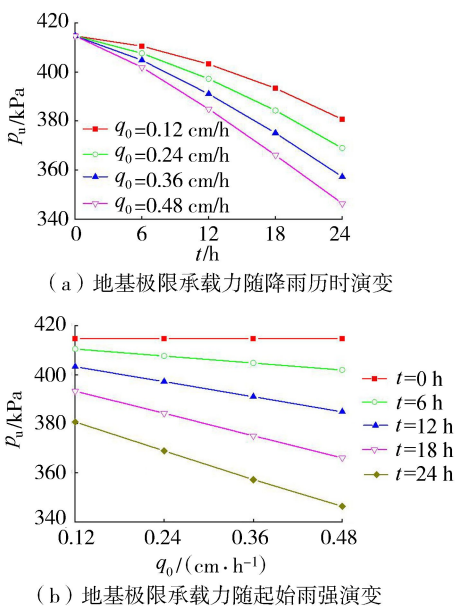


图4 起始雨强对地基极限承载力的影响

随着起始雨强  $q_0$  增加迅速降低,承载力降幅随降雨历时增加而变大。这是因为起始雨强  $q_0$  越大,初期入渗雨量大,基质吸力减小越快,导致地基极限承载力在降雨初期迅速降低。

### 3.2 雨强变化系数的影响

降雨历时 24 h,起始雨强  $q_0 = 0.24$  cm/h 保持不变,分别取雨强变化系数  $a = 0$  cm/h<sup>2</sup>、0.01 cm/h<sup>2</sup>、0.02 cm/h<sup>2</sup>、0.03 cm/h<sup>2</sup> 来研究雨强变化系数  $a$  对地基极限承载力的影响,结果如图 5 所示。

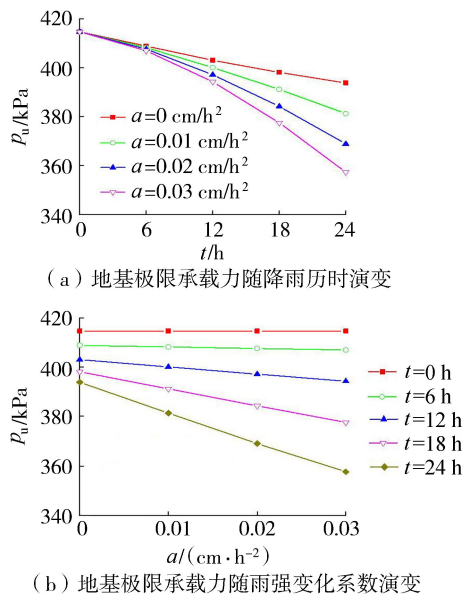


图5 雨强变化系数对地基极限承载力的影响

从图 5(a) 可以看出:经历 4 种不同雨强变化系数的后峰型降雨历时 24 h 入渗后,地基极限承载力由 414.6 kPa 分别降低为 393.7 kPa、381.3 kPa、368.8 kPa 和 357.4 kPa;雨强变化系数  $a$  越大,地基极限承载力降低越快,当雨强变化系数  $a = 0$  时,降

雨退化为均匀型,此时地基极限承载力降低最慢,随降雨历时呈现近似线性减小特点。这是因为雨强变化系数  $a$  越大,降雨强度增加越快,进入地基的雨水越多,地基中上部基质吸力减小越大,地基极限承载力降低越快。由图 5(b) 可知:降雨初期,入渗雨强变化不大,地基极限承载力降幅受雨强变化系数  $a$  影响不大;随着时间推移,雨强变化系数  $a$  较大的后峰型降雨,雨强值大幅增加,入渗地基的雨水增多,地基极限承载力迅速降低。

## 4 结论

a. 遭遇后峰型降雨入渗时,地基极限承载力随降雨历时增加而逐渐降低,降低速率呈现先慢后快的非线性特点,不同于遭遇均匀型降雨时地基极限承载力近线性减小的特点。

b. 地基极限承载力受起始雨强和雨强变化系数影响较大;雨强变化系数一定时,起始雨强越大,地基极限承载力降低越快;起始雨强一定时,雨强变化系数越大,地基极限承载力降低越快。

### 参考文献:

[1] VANAPALLI S K, MOHAMED F M O. Bearing capacity of model footings in unsaturated soils [J]. Springer Proceedings in Physics, 2007, 112: 483-493.

[2] 王海鹏,徐杨,唐彤芝,等. 超软地基排水板弯折特性与抗弯折结构[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022, 50(6): 130-137. (WANG Haipeng, XU Yang, TANG Tongzhi, et al. Bending characteristics and anti-bending structure of drainage plate in super soft foundation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 130-137. (in Chinese))

[3] 秦卫星,胡惠仁,廖紫欣,等. 基于 BP-Olden 方法的均质地基基质吸力影响因素显著性分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(1): 103-108. (QIN Weixing, HU Huiren, LIAO Zixin, et al. Significant analysis of influence factors on matric suction of homogeneous foundation based on the BP-Olden method [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(1): 103-108. (in Chinese))

[4] 张常光,晏青,周菲,等. 不同吸力分布下条形地基极限承载力解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1237-1251. (ZHANG Changguang, YAN Qing, ZHOU Fei, et al. Formulas of ultimate bearing capacity for strip foundation on unsaturated soils with different suction distributions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1237-1251. (in Chinese))

[5] 赵炼恒,李亮,杨峰,等. 基于 SQP 和上限法的非饱

- 和土条形基础极限承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3021-3028. (ZHAO Lianheng, LI Liang, YANG Feng, et al. Ultimate bearing capacity calculation of strip foundation on unsaturated soil with upper bound theorem and SQP method. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 3021-3028. (in Chinese))
- [6] VAHEDIFARD F, ROBINSON J D. Unified method for estimating the ultimate bearing capacity of shallow foundations in variably saturated soils under steady flow [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(4): 04015095.
- [7] 陈茜, 程大伟. 稳态流下非饱和土地基承载力模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 9-14. (CHEN Xi, CHENG Dawei. Bearing capacity model for foundations of unsaturated soil under steady flow condition [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6): 9-14. (in Chinese))
- [8] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration towards the water table in homogeneous and layered soils [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 753-762.
- [9] ZHAN T L, JIA G W, CHEN Y M, et al. An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(12): 1737-1760.
- [10] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [11] VESIC A B. Analysis of ultimate loads of shallow foundations [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(1): 45-73.
- [12] 张秀勇, 王海龙, 李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 455-459. (ZHANG Xiuyong, WANG Hailong, LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459. (in Chinese))
- (收稿日期: 2022-05-24 编辑: 刘晓艳)

.....

(上接第 15 页)

- [10] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, LI Kun, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake [J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): e2020WR028284.
- [11] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3): 333-350.
- [12] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 50-55. (ZENG Cheng, CHEN Chen, ZHOU Zhou, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 50-55. (in Chinese))
- [13] 张强, 王平义, 刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 458-460. (ZHANG Qiang, WANG Pingyi, LIU Qianying. Re-division of confluence patterns of main stream and tributaries of rivers at mountainous area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(3): 458-460. (in Chinese))
- [14] ROBERTS M V T. Flow dynamics at open channel confluent-meander bends [D]. Leeds: University of Leeds, 2004.
- [15] 张为, 刘林, 袁晶. 长江上游干支流交汇河段水流数学模型研究及应用 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(34): 8466-8470. (ZHANG Wei, LIU Lin, YUAN Jing. 2-D flow mathematical model and its application for the typical reach at the confluence of main stream and tributary in upstream Yangtze River [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(34): 8466-8470. (in Chinese))
- [16] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇合口水沙运动试验及数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [17] SUI Bin, HUANG Shehua. Numerical analysis of flow separation zone in a confluent meander bend channel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(4): 716-723.
- [18] 高艳, 黄社华, 李琼. 弯道干流与支流交汇口垂线流速分布的试验研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 90-93. (GAO Yan, HUANG Shehua, LI Qiong. Experimental research on velocity distribution along depth at junction of bend stream with branch afflux [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 90-93. (in Chinese))
- [19] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950, 115(1): 751-778.
- [20] 隋斌. 明渠弯道交汇水流水力特性的大涡模拟与实验研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- (收稿日期: 2022-05-31 编辑: 俞云利)

# 水性环氧砂浆与混凝土界面剪切性能试验研究

张雷<sup>1,2</sup>, 黄飞亚<sup>1,3</sup>, 张英豪<sup>1,2</sup>, 曹建国<sup>4</sup>, 吴安兴<sup>4</sup>, 赛米·艾木都立<sup>4</sup>, 刘东<sup>5</sup>

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

2. 河南省水电工程磨蚀测试与防护工程技术研究中心, 河南 郑州 450003;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

4. 新疆轮台县长瑞鑫水务有限公司, 新疆 轮台 841600; 5. 河南智河工程技术有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:**针对水泥基修补材料与混凝土界面剪切强度没有标准测试方法的问题,设计了一种双L直剪试验装置,该装置能够有效避免弯曲应力的影响,使界面处发生纯剪破坏。采用该装置试验研究了混凝土表面粗糙度、含水率和界面剂类型对砂浆-混凝土界面剪切强度的影响。结果表明:适度的粗糙处理有利于剪切强度的提高,粗糙度过大剪切强度反而降低;混凝土表面含水率越高,界面剪切强度越低,含水率对剪切强度影响显著;使用界面剂能够加强界面过渡区的结构,依据混凝土表面干湿情况选取合适的界面剂有助于黏结界面抗剪性能的提高。

**关键词:**双L直剪;混凝土;水性环氧砂浆;粗糙度;含水率;界面剂

中图分类号:TV32

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0039-05

**Experimental study on shear performance of waterborne epoxy mortar and concrete interface//ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, HUANG Feiya<sup>1,3</sup>, ZHANG Yinghao<sup>1,2</sup>, CAO Jianguo<sup>4</sup>, WU Anxing<sup>4</sup>, SAIMI Aimuduli<sup>4</sup>, LIU Dong<sup>5</sup>(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Engineering Research Center of Hydropower Engineering Abrasion Test and Protection, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Xinjiang Luntai Changruixin Water Affairs Co., Ltd., Luntai 841600, China; 5. Henan Zhihe Engineering Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)**

**Abstract:** Aiming at the problem that there is no standard test method for the shear strength of cement-based repair material and concrete interface, a double L direct shear test device was designed, which can effectively avoid the influence of bending stress and make pure shear failure at the interface. Based on this test device, the effects of concrete surface roughness, water content and interfacial agent type on the shear strength of mortar-concrete interface were studied. The results show that moderate roughness treatment is conducive to the improvement of shear strength, and the shear strength decreases when the roughness is too large. The higher the surface moisture content of concrete, the lower the interfacial shear strength will be, and the surface moisture content has a significant influence on the shear strength. The use of interfacial agent can strengthen the structure of interface transition zone, and the selection of appropriate interfacial agent according to the dry and wet conditions of concrete surface is helpful to improve the shear performance of the bonding interface.

**Key words:** double L direct shear; concrete; waterborne epoxy mortar; roughness; moisture content; interface agent

高速含沙水流对过流面的冲磨破坏是水工泄水建筑物常见的危害之一,近70%大型混凝土坝运行过程中存在冲磨破坏现象<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着混凝土修补加固技术的飞速发展,水性环氧砂浆以其优异的抗冲磨性能<sup>[4]</sup>、良好的力学性能和黏结性能<sup>[5]</sup>,成为重要的修补加固材料之一<sup>[6]</sup>。然而,当老混凝土接近完成水化,而新砂浆存在体积收缩时,两者的结合面存在变形协调的问题,在外部荷载和体积收

缩的共同作用下,砂浆-混凝土界面往往由于剪力作用而率先失效<sup>[7-9]</sup>。目前,对聚合物改性砂浆与混凝土黏结抗拉强度的研究已有很多<sup>[10-12]</sup>,但对黏结抗剪强度的研究仍有不足<sup>[13-20]</sup>。由于现行规范DL/T 5126—2001《聚合物改性水泥砂浆试验规程》中砂浆-混凝土界面剪切强度测试方法无相关条文规定,而常用的双面剪切、斜剪等<sup>[21-24]</sup>试验方法不能使界面处发生纯剪切破坏,故亟待设计一种新的

试验装置开展专项研究。本文以水性环氧砂浆与混凝土黏结界面为对象,采用自制双 L 试验装置重点研究了混凝土表面粗糙度、含水率和界面剂类型对剪切强度的影响,以促进水性环氧砂浆在工程加固修复中的应用。

## 1 试验装置与材料

### 1.1 双 L 直剪试验装置设计

双 L 直剪试验装置由 2 块相同的 L 形挡板和 4 块侧板以及固定侧板的 4 组螺栓组成。L 形挡板中部开有工形槽,侧板卡入工形槽中夹住试件,通过螺栓固定侧板,确保试件不会滑落。双 L 直剪试验装置示意图如图 1 所示。

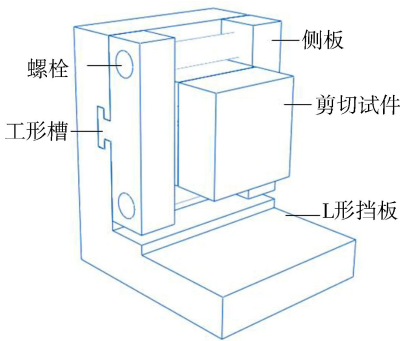


图 1 双 L 直剪装置示意图

双 L 直剪试验装置成品如图 2 所示,装置的上表面受到试验机压力荷载,并通过紧贴混凝土试件的侧边及挡板转化为摩擦力传达到试件表面,使其在剪力作用下发生破坏,试件两侧受到方向相反的剪切摩擦力作用。由于试件上下表面没有受到作用力,因此,试件在破坏过程中不会受到弯剪作用的影响。



图 2 双 L 直剪试验装置成品

### 1.2 原材料及配合比

参考水工泄水建筑物常用混凝土强度,本文试验中基底混凝土强度等级选用 C40,剪切试验中混凝土基底原材料如下:①诸城市杨春水泥有限公司产 P·O52.5 普通硅酸盐水泥;②细骨料为洁净的中砂,细度模数为 2.3~2.7;③粗骨料为洗净后晾干的碎石,碎石直径为 5~15 mm;④本地自来水。C40 强度等级混凝土 7 d 抗压强度为 31.36 MPa,28

d 抗压强度为 42.52 MPa,水、水泥、砂、石子和高效减水剂的比例为 0.44:1:1.82:2.51:0.008。

水性环氧树脂采用上海汉中化工有限公司产水性环氧树脂体系,分为 A、B 两组分,其中 A 组分为 H123A 环氧树脂,B 组分为 H123B 环氧固化剂。水性环氧树脂乳液由 A、B 两组分和水按照 1:1.3:2.5 配制,乳液掺量为 15%,28 d 抗压强度为 45.46 MPa。

### 1.3 混凝土表面粗糙度和含水率

混凝土表面依据不同抛光、刷毛处理和 3 种凿毛程度设置 5 种不同的粗糙度,记 5 种粗糙度分别为  $r_1 \sim r_5$ ,得到相应的灌砂平均深度如表 1 所示。

表 1 不同粗糙程度的灌砂平均深度

粗糙度	混凝土表面处理	灌砂平均深度/mm
$r_1$	采用砂纸均匀抛光 1 min	0.0274
$r_2$	钢丝刷轻度按压,均匀刷毛 1 min	0.1139
$r_3$	凿除表面浮浆,使石子露出大约 10%	0.6086
$r_4$	中度凿毛,使石子露出大约 30%	1.0410
$r_5$	重度凿毛,使石子露出大约 50%	1.8751

混凝土表面含水率采用真空干燥法和自然浸泡法配合进行控制<sup>[24]</sup>,在混凝土表面饱和含水率分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 时,设置 5 组不同的表面含水率。在混凝土含水率达到相应的目标含水率后将混凝土块从水中取出,擦干表面水分并迅速用保鲜膜包裹密实,确保不与外界发生水分交换,保证质量不发生变化,在室温下静置 3 d 使内部水分扩散均匀,此时混凝土块的含水率即为混凝土表面含水率。记 5 种不同饱和含水度对应的目标含水率分别为  $w_1 \sim w_5$ ,得到混凝土表面含水率如表 2 所示。

表 2 不同饱和含水度下的混凝土表面含水率

饱和含水度/%	目标含水率	混凝土表面含水率/%
0	$w_1$ (干基)	0
25	$w_2$	1.04
50	$w_3$	2.07
75	$w_4$	3.11
100	$w_5$ (饱水)	4.14

### 1.4 剪切试件制作及界面处理

双 L 直剪试件为 100 mm 立方体试块,首先将养护 28 d 的 100 mm 立方体混凝土从中间切割开,得到 2 个 100 mm×100 mm×50 mm 的混凝土基底备用。为提高水性环氧砂浆与原混凝土的黏结性能,往往需要涂刷界面剂,通过优化选择,分别以水性环氧乳液和与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆作为界面剂,并与未涂刷界面剂的情况进行对比分析,研究界面剂类型对水性环氧砂浆-混凝土黏结界面剪切强度的影响。混凝土表面经过相应的处理及涂刷界面剂后,以 100 mm×100 mm 的横截面作为黏结面,浇筑 50 mm 厚水性环氧砂浆,自然养护 7 d 后进行双 L 直剪试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏特征

界面过渡区是砂浆-混凝土黏结体系的薄弱区域,剪切试件基本上都从黏结界面处发生破坏。首先在界面底部产生裂缝,随着压力的进一步增大,裂缝迅速向上扩展,最终贯穿整个界面造成剪切破坏。混凝土表面粗糙度越大,有越多水泥石及小石子黏结在砂浆表面。使用水性环氧乳液界面剂时,砂浆表面会产生白色环氧乳液薄膜,混凝土表面含水率越高,乳液薄膜面积越大。在饱水状态时,乳液薄膜几乎覆盖整个砂浆表面。不同含水率时混凝土和砂浆表面形态如图3所示。

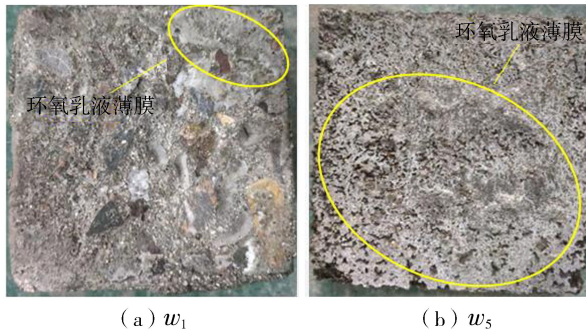


图3 不同含水率时混凝土和砂浆表面

### 2.2 粗糙度对剪切强度的影响

将经过表面处理的混凝土基底烘干并冷却至室温后涂刷环氧乳液界面剂,通过双L直剪试验,得到混凝土表面5种粗糙度下的界面剪切强度,每组3个试件,取它们的平均值为该组试件的抗剪强度,得到 $r_1 \sim r_5$ 粗糙度下混凝土-水性环氧砂浆的直剪剪切强度分别为1.8574 MPa、2.4658 MPa、2.7626 MPa、3.0197 MPa和2.8413 MPa。

由试验结果可以看出,随着混凝土表面粗糙度的增加,界面剪切强度先增后降。粗糙度低于 $r_4$ 时,随着粗糙度的增加,界面剪切强度也增大。与混凝土表面抛光相比,经过中度凿毛处理使石子裸露大约30%时,界面剪切强度增加了62.58%。随着表面粗糙度进一步提高,剪切强度反而降低,表明粗糙度应有一定的限制,过高的粗糙度并不能带来更高的剪切强度。

水性环氧砂浆与混凝土界面黏结作用力包括黏结力、机械咬合力和化学作用力。其中,砂浆-混凝土界面剪切性能主要依靠机械咬合力。混凝土表面粗糙度对界面剪切强度的影响可以从以下两方面分析:一方面,混凝土表面进行粗糙处理后,与水性环氧砂浆的有效接触面积增大,相应增加了界面黏结面积,提高了砂浆-混凝土界面的黏结力;另一方面,由于混凝土表面粗糙度的增加,水性环氧砂浆与混凝土相互交错、互相

嵌入,形成类似于机械齿轮之间的咬合作用,极大地提高了界面处机械咬合力,使得界面剪切强度大幅提高。因此,粗糙度低于 $r_4$ 时,随着粗糙度增加,砂浆与混凝土之间黏结力和机械咬合力均增大,造成界面剪切强度增大。当在混凝土表面重度凿毛使石子裸露大约50%时,界面剪切强度降低,其原因可能是凿毛过程造成了较多的裂缝、孔隙以及部分粗细骨料松动。

### 2.3 表面含水率对剪切强度的影响

混凝土表面采取中度凿毛处理并涂刷环氧乳液界面剂后,通过双L直剪试验,得到混凝土目标含水率为 $w_1 \sim w_5$ 的界面剪切强度分别为3.1132 MPa、2.6563 MPa、2.3428 MPa、2.0895 MPa和1.9504 MPa。试验结果表明,混凝土表面含水率与砂浆-混凝土界面剪切强度成反比关系,表面含水率越高,剪切强度越低,且随着表面含水率的升高,剪切强度的降低速度趋缓。造成这种现象的可能原因是:当混凝土表面含水率过高时,会在混凝土表面形成一层水膜,水膜阻止了水性环氧砂浆与基底混凝土的接触,不利于砂浆嵌入混凝土表面裂缝和孔隙以形成机械齿轮咬合作用,造成机械咬合力降低。同时,混凝土表面的孔隙均被水分填满,待水分挥发后,在界面处形成空泡,降低了有效黏结面积,使得修补界面的黏结不够紧密,也造成界面剪切强度下降。

### 2.4 界面剂类型对剪切强度的影响

依据上文研究结果,采用中度凿毛的表面处理方式,在干基和饱水两种情况下,研究无界面剂、涂刷水性环氧乳液界面剂和与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆界面剂时砂浆-混凝土界面的剪切强度,试验结果如图4所示。

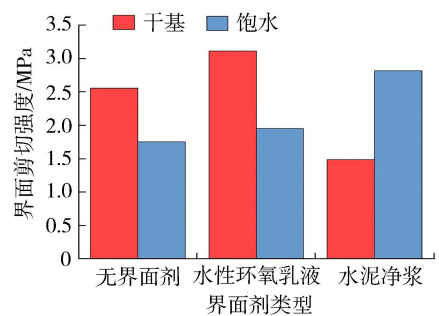


图4 界面剂类型对剪切强度的影响

试验结果表明:水性环氧乳液与混凝土界面剪切强度最大值、最小值均出现在干基状态下,采用水性环氧乳液界面剂时剪切强度最大,为3.1121 MPa;采用水泥净浆界面剂时最小,仅有1.4856 MPa。在无界面剂和使用水性环氧乳液界面剂时,干基时的剪切强度均大于饱水时;使用水泥净浆界面剂时,干基时的剪切强度反而低于饱水时,在干基和饱水情况下的界面剪切强度分别为1.4856 MPa和2.8174 MPa,与

干基相比饱水时剪切强度增幅达到 89.65%, 增长显著。造成这种现象的原因可能是: 混凝土表面饱水时, 在混凝土表面形成了一层水膜, 封闭了混凝土表面的微小孔隙、裂缝, 不利于新拌砂浆与混凝土形成“齿轮”以增大机械咬合力。因此, 在无界面剂和使用水性环氧界面剂时饱水状态下界面剪切强度低于干基。采用与水性环氧砂浆同水灰比的水泥净浆界面剂时, 在干基状态下, 混凝土基底吸收了大量的水分, 不利于界面处水泥的水化, 造成剪切强度显著降低, 部分试块甚至自动脱粘。

不使用界面剂时, 新拌砂浆与老混凝土之间为“硬接触”, 在环氧改性砂浆固化收缩中与老混凝土的变形协调问题比较突出, 黏结界面为整体剪切试件的薄弱环节。界面黏结力主要是机械咬合力和范德华力, 其中机械咬合力起主要作用。此时, 水性环氧砂浆中的粗细骨料不易嵌入混凝土表面的缝隙和孔隙, 不利于机械咬合力的提高。此外, 不采用界面剂会造成黏结界面处出现较多空隙, 降低了有效黏结面积, 使得剪切强度较低。

水性环氧砂浆在填筑过程中, 由于需要插捣密实, 会造成细骨料挤压在界面处与基底混凝土形成“点接触”, 阻碍了水性环氧砂浆与混凝土的接触, 造成“缺浆”现象。“缺浆”使得界面处的水性环氧砂浆出现孔隙, 造成黏结强度降低。使用水性环氧乳液界面剂时, 不仅能够填补混凝土表面缺陷, 增大机械咬合力, 还能够对界面处水性环氧砂浆进行“补浆”, 有利于提高水性环氧砂浆的黏结强度。使用水泥净浆界面剂与使用水性环氧乳液界面剂类似, 可以减少界面过渡区的空隙。水泥净浆能够在界面处生成水化硅酸钙凝胶、氢氧化钙及钙矾石二次结晶体填充界面过渡区, 使得黏结界面的结构得到加强。在混凝土表面涂刷水泥净浆界面剂后, 水泥水化反应中的化学作用力也有利于界面剪切强度的提高。总之, 界面剂的使用能够使得过渡区更加致密, 改善了水性环氧砂浆与混凝土黏结界面的微观形态。

### 3 结 论

a. 当混凝土表面粗糙度低于  $r_4$ , 即混凝土表面经中度凿毛处理使石子露出 30% 以下时, 随着粗糙度的增加, 界面剪切强度增大; 之后粗糙度进一步增加, 界面剪切强度反而降低。

b. 采用环氧乳液界面剂时, 混凝土表面含水率越高, 界面剪切强度越低。混凝土表面湿润时形成的水膜阻碍水性环氧砂浆渗入混凝土表面裂缝和孔隙, 不利于机械咬合力的提高是造成这种现象的可

能原因。

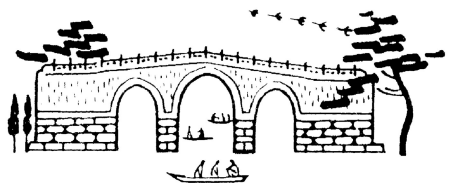
c. 界面剂的使用使界面过渡区的结构更加致密, 有利于剪切强度的提高。干基状态下, 水性环氧乳液界面剂效果最好, 而在混凝土表面饱水时, 与砂浆同水灰比的水泥净浆能提供更优异的抗剪性能。

### 参考文献:

- [1] 杨春光. 水工混凝土抗冲磨机理及特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2006.
- [2] 韩成银, 刘红军, 傅宗甫, 等. 除险加固水闸的消能防冲措施[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 42-46. (HAN Chengyin, LIU Hongjun, FU Zongfu, et al. Energy dissipation and scour prevention measures of reinforced sluices [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 42-46. (in Chinese))
- [3] 牟献友, 文恒. 废旧轮胎在闸下消能防冲中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 64-66. (MOU Xianyou, WEN Heng. Application of scrap tires in energy dissipation and erosion control under sluice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 64-66. (in Chinese))
- [4] 俞亮, 张雷, 郭家琛. 水性环氧砂浆抗冲磨特性研究[J]. 人民黄河, 2021, 44(1): 1-6. (YU Liang, ZHANG Lei, GUO Jiachen. Study on the abrasion resistance of waterborne epoxy mortar [J]. Yellow River, 2021, 44(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] 程红强, 高丹盈, 刘国龙. 改性环氧水泥浆试验设计及其黏结性能[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 57-59. (CHENG Hongqiang, GAO Danying, LIU Guolong. Test design of modified epoxy cement mortar and its application to concrete bonding repair [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1): 57-59. (in Chinese))
- [6] 张振忠, 陈亮, 汪在芹, 等. 水工泄水建筑物抗冲磨材料发展现状[J]. 化工新型材料, 2016, 44(10): 230-232. (ZHANG Zhenzhong, CHEN Liang, WANG Zaiqin, et al. Development status of anti-abrasion materials for hydraulic drainage buildings [J]. New Chemical Materials, 2016, 44(10): 230-232. (in Chinese))
- [7] 田稳苓, 宋昭, 肖成志, 等. 带植筋新老混凝土黏结面剪切试验及有限元模拟分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 127-133. (TIAN Wenling, SONG Zhao, XIAO Chengzhi, et al. Shear test and finite element simulation analysis of bonding interface of new and old concrete with planting bars [J]. Building Structure, 2019, 49(23): 127-133. (in Chinese))
- [8] 李斌, 肖成志, 孙文君. 新老混凝土界面连接形式对其界面剪切作用特性的影响分析[J]. 河北水利电力学院学报, 2019(2): 22-27. (LI Bin, XIAO Chengzhi, SUN

- Wenjun. Effect analysis of new and old concrete connection forms on interface properties under shear action [J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2019(2):22-27. (in Chinese))
- [9] 白鹏翔,倪英荐,蒋睿,等. 基于数字图像相关技术的混凝土剪切破坏实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 105-110. (BAI Pengxiang, NI Yingjian, JIANG Rui, et al. Experimental research of concrete shearing failure based on digital image correlation technology[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(36): 105-110. (in Chinese))
- [10] 刘志伟,张雷,王中林,等. 水性环氧砂浆修复混凝土的黏接界面性能[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 256-261. (LIU Zhiwei, ZHANG Lei, WANG Zhonglin, et al. Bonding interface performance of waterborne epoxy mortar for repairing concrete [J]. Foundation Treatment, 2021, 3(3): 256-261. (in Chinese))
- [11] 彭杰,胡铁刚,单韧,等. 水性环氧改性快速修补砂浆的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(7): 128-130. (PENG Jie, HU Tiegang, SHAN Ren, et al. Research of waterborne epoxy modified rapid repair mortar [J]. New Building Materials, 2021, 48(7): 128-130. (in Chinese))
- [12] 王钰轲,于博文,曹天才,等. 非水反应高聚物-混凝土界面单调剪切特性及本构模拟[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 122-131. (WANG Yuke, YU Bowen, CAO Tiancai, et al. Constitutive simulation and interfacial shear characteristics of non-water reaction polymer and concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 122-131. (in Chinese))
- [13] 伍敏,黄莉,张小玉,等. FRP-混凝土的颗粒增强界面及其剪切性能研究[J]. 混凝土, 2022(1): 57-60. (WU Min, HUANG Li, ZHANG Xiaoyu, et al. Study on the shear properties of FRP-concrete interface layer with reinforced particles [J]. Concrete, 2022(1): 57-60. (in Chinese))
- [14] 李淑芬,贺晓东. 再生混凝土新旧界面剪切特性研究[J]. 科学技术创新, 2021(12): 153-154. (LI Shufen, HE Xiaodong. Study on shear characteristics of new and old interface of reclaimed concrete [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(12): 153-154. (in Chinese))
- [15] 章凯. 环氧树脂乳液改性水泥砂浆性能与结构[J]. 新型建筑材料, 2012, 39(12): 40-42. (ZHANG Kai. Properties and structure of cement mortar modified with epoxy emulsion [J]. New Building Materials, 2012, 39(12): 40-42. (in Chinese))
- [16] 卜良桃,罗兴华. 钢纤维水泥砂浆与老混凝土双面剪切黏结性能研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(9): 90-94. (BU Liangtao, LUO Xinghua. Two-sided shearing bonding strength of steel fiber cement mortar to old concrete [J]. Industrial Construction, 2009, 39(9): 90-94. (in Chinese))
- [17] 朱海堂,高丹盈,张启明. 钢纤维高强混凝土的劈拉及剪切变形性能[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 5-8. (ZHU Haitang, GAO Danying, ZHANG Qiming. Deformation behavior of steel fiber-reinforced high strength concrete under splitting or shear [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 5-8. (in Chinese))
- [18] 卜良桃,全玥. 高性能水泥复合砂浆与混凝土黏结的剪切性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008(3): 64-67. (BU Liangtao, QUAN Yue. Experimental research on shear properties of adhesion between high performance cement-mortar and concrete [J]. Sichuan Building Science, 2008(3): 64-67. (in Chinese))
- [19] 柯敏勇,金初阳,陈红卫,等. 外贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 29-32. (KE Minyong, JIN Chuyang, CHEN Hongwei, et al. Experimental study on strengthening RC beams with externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheets [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 29-32. (in Chinese))
- [20] 王少伟,徐应莉,朱平华,等. 溶蚀作用下混凝土层间劈裂抗拉强度试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 27-32. (WANG Shaowei, XU Yingli, ZHU Pinghua, et al. Experimental study on splitting tensile strength of concrete layer interface under dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 27-32. (in Chinese))
- [21] MOMAYEZ A, EHSANI M R, RAMEZANIANPOUR A A, et al. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(4): 748-757.
- [22] RAY I, DAVALOS J F, LUO S. Interface evaluations of overlay-concrete bi-layer composites by a direct shear test method [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 339-347.
- [23] WALL J S, SHRIVE N G, GAMBLE B R. Testing of bond between fresh and hardened concrete [M]. Boston, M A: Springer, 1986: 335-344.
- [24] 孟繁强. 新旧砂浆黏结性能及水分传输规律试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.

(收稿日期:2022-02-06 编辑:骆超)



# 基于改进响应面的邓肯-张 E-B 模型参数全局敏感性分析

冯亚新<sup>1</sup>, 江兆强<sup>2</sup>, 孙一清<sup>1</sup>, 王润英<sup>1</sup>, 沈振中<sup>1</sup>, 徐力群<sup>1</sup>,  
甘磊<sup>1</sup>, 李皓璇<sup>1</sup>, 刘源<sup>1</sup>, 桂靖鹏<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 云南省滇中引水工程有限公司, 云南 昆明 650051; 3. 淮安运西水利管理所, 江苏 淮安 223299)

**摘要:**为研究邓肯-张 E-B 模型参数及参数之间的交互作用对大坝变形的影响,以某均质黄土坝为研究对象,利用改进的响应面方法分析了邓肯-张 E-B 模型参数的全局敏感性。通过部分因子设计筛选出对土坝变形影响较为显著的 5 个参数为  $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$ ,再利响应面方法中的中心复合设计对筛选结果做进一步的全局响应面分析,考察参数及参数之间的交互作用对土坝变形的影响。结果表明, $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$  是对大坝位移敏感性最强的 3 个参数,这 3 个参数之间的交互作用对于大坝变形的敏感性同样重要,且高于单个因素的敏感性,在类似工程计算中应考虑参数之间的交互作用。

**关键词:**邓肯-张 E-B 模型;均质黄土坝;部分因子设计;中心复合设计;全局敏感性分析

中图分类号:TV641.2<sup>+</sup>2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0044-07

**Global sensitivity analysis of parameters in Duncan-Chang E-B model based on improved response surface//FENG Yaxin<sup>1</sup>, JIANG Zhaoqiang<sup>2</sup>, SUN Yiqing<sup>1</sup>, WANG Runying<sup>1</sup>, SHEN Zhenzhong<sup>1</sup>, XU Liqun<sup>1</sup>, GAN Lei<sup>1</sup>, LI Haoxuan<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, GUI Jingpeng<sup>3</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Central Yunnan Provincial Water Diversion Project Co., Ltd., Kunming 650051, China; 3. Huai'an District Yunxi Water Management Institute, Huai'an 223299, China)**

**Abstract:** In order to study the influence of Duncan-Chang E-B model parameters and their interactions on dam deformation, the global sensitivity of parameters in Duncan-Chang E-B model was studied using the improved response surface method for a homogeneous loess dam. Firstly, five parameters including  $R_f$ ,  $\gamma$ ,  $\varphi_0$ ,  $K_b$  and  $K$ , which have significant influence on the deformation of earth dam were screened out by fractional factorial design. Then the central composite design in the response surface method was used to conduct further global response surface analysis on the screening results and investigate the influence of parameters and their interaction on the deformation of earth dams. The results show that  $R_f$ ,  $\gamma$  and  $\varphi_0$  are the three most sensitive parameters to dam displacement, and the interaction between them is also significantly sensitive to dam deformation, which is greater than the sensitivity of a single factor. Therefore, the interaction between the parameters should be considered in similar engineering calculations.

**Key words:** Duncan-Chang E-B model; homogeneous loess dam; fractional factorial design; central composite design; global sensitivity analysis

土石坝是水利工程建设中最常见的坝型之一,因其具有对各种地形和地质的适应能力强、可就地取材、施工方便等优点而被广泛应用,有着广阔的发展前景<sup>[1-2]</sup>。在我国,百米级的土石坝工程建设虽然起步晚,但发展速度极快。如今,我国土石坝建设高度已达 300 m 级,包括坝高 314 m 的双江口大坝和坝高 315 m 的如美大坝<sup>[3]</sup>。已有施工实践表明,在

高土石坝建设与运行过程中,大坝常常会产生不同程度的位移变形。

由于大坝填料是非连续的颗粒,因此大坝坝体的变形常采用非线性有限元方法计算,其本构模型常采用邓肯-张 E-B 模型。赵晓龙等<sup>[4]</sup>、黄焜等<sup>[5]</sup>和汪天飞等<sup>[6]</sup>采用邓肯-张 E-B 模型对不同类型的土石坝进行了三维有限元计算,结果表明坝体位移、

**基金项目:**国家自然科学基金雅砻江联合基金(U1765205);国家重点研发计划(2019YFC1510802);国家自然科学基金面上项目(52179130)

**作者简介:**冯亚新(1998—),男,硕士研究生,主要从事水利工程渗流特性分析控制方法研究。E-mail:294581753@qq.com

**通信作者:**王润英(1972—),女,副教授,博士,主要从事水工程建设管理与安全评价研究。E-mail:wry6888@126.com



应力符合大坝变形的的基本规律。其中,赵晓龙等<sup>[4]</sup>研究了深厚覆盖层上心墙堆石坝,发现心墙的拱效应很明显。姜海波<sup>[7]</sup>则以某复合土工膜高土石坝为例进行研究,计算结果表明复合土工膜对降低坝体浸润线,减小坝体孔隙水压力均有显著作用,堆石体的应力应变有了一定的改善。可见,邓肯-张 E-B 模型在大坝数值模拟研究中被广泛使用,但模型参数的准确获取仍是研究的重点。目前,针对大坝变形参数的获取,除了依靠三轴试验以外<sup>[8-9]</sup>,比较常见的是利用参数反演获得。陆周祺<sup>[10]</sup>结合某堆石坝监测资料及室内三轴试验成果,基于免疫遗传算法对堆石坝流变参数进行反演,其计算结果与实测值较为吻合。贾宇峰等<sup>[11]</sup>利用变异粒子群算法对某堆石坝堆石料和心墙料参数进行反演,根据计算结果分析和预测了大坝的变形特性。但参数反演仍存在需要大量训练样本的缺陷,随着研究深入,学者们发现可以通过研究影响大坝变形参数的敏感性大小,将敏感性较低的参数采用工程类比等方法确定,以实现在保证计算精度的前提下提高计算效率的目的。

近年来,敏感性分析方法被广泛应用于大坝工程的参数寻优以及重要性判断方面。周邠鹏等<sup>[12]</sup>基于数值计算结果分析了渗控效应对黏土心墙、帷幕、山岩材料渗透系数的敏感性。陈志波等<sup>[13]</sup>采用邓肯-张非线性弹性模型研究了两河口心墙堆石坝坝体下游次堆石区范围及其参数变化、高塑性黏土厚度及其参数变化对坝体应力变形的影响。随着敏感性分析的深入,学者们发现可以通过科学安排试验次数,在较少的试验次数下尽可能全面地得到敏感性分析结果。李火坤等<sup>[14]</sup>将正交试验法与粒子群算法相结合,分析了拱坝及地基的动弹性模量区域对拱坝模态参数的敏感性,以此确定了待反演的动弹性模量区域。李炎隆等<sup>[15]</sup>基于正交试验法对面板堆石坝高模量区模型参数进行敏感性分析,发现体积模量基数  $K_b$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、体积模量指数  $m$  敏感性较高,而弹性模量基数  $K$ 、弹性模量指数  $n$  等参数对坝体沉降、面板挠度及顺坡向应力的敏感性较低。陈辉等<sup>[16]</sup>对某堆石坝采用单因素敏感性分析方法和基于双判别式的正交试验敏感性分析方法,得出初始内摩擦角、体积模量数、密度、破坏比、弹性模量数等对大坝变形影响显著的结论。但上述使用试验设计对大坝变形参数敏感性的研究仍停留在局部敏感性分析阶段。

当前在大坝工程中应用的正交试验法多是局部敏感性分析,仅考虑了单因素作用对分析指标的影响,没有考虑因素之间的交互作用的影响,但是在实际工程中这种交互作用往往是不可忽略的。与此同

时,邓肯-张 E-B 模型参数众多,做正交试验不可能同时考虑所有参数及参数之间的交互作用,因此需要对模型中的参数进行筛选,即剔除敏感性较弱的参数。本文以某均质黄土坝为例,先通过部分因子设计对邓肯-张 E-B 模型中参数进行敏感性分析,筛选出对大坝变形影响显著的参数,再利用中心复合设计对筛选出的参数进行全局响应面分析,研究参数及参数之间的交互作用对土坝变形的敏感性排序,以期为土石坝邓肯-张 E-B 模型参数选取提供参考。

## 1 敏感性分析原理

敏感性分析方法包括局部敏感性分析法和全局敏感性分析法。其中,全局敏感性分析法能够更好地反映因素之间交互作用<sup>[17]</sup>。但由于因素众多,无法将所有因素的交互作用都纳入考量,因此有必要先筛选出对试验指标敏感性较强的几个参数,然后再对筛选出来的参数进行全局敏感性研究,对响应面全局敏感性分析法进行改进。具体过程如下:①部分因子设计,利用部分因子试验对 8 个参数进行设计,对各试验的计算结果采用方差分析法进行分析,筛选出影响显著的参数;②中心复合设计,对部分因子设计筛选出的参数进行中心复合设计,对试验结果进行方差分析,绘制等值线图,进一步研究参数之间的交互作用对均质黄土坝变形的敏感性。

在大坝变形参数的选择上,邓肯-张 E-B 模型一共包括 10 个计算参数:黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi_0$ 、围压增加一个对数周期下内摩擦角的减小值  $\Delta\varphi$ 、破坏比  $R_f$ 、弹性模量基数  $K$ 、体积模量基数  $K_b$ 、体积模量指数  $m$ 、弹性模量指数  $n$ 、卸载再加荷时的弹性模量基数  $K_{ur}$ 、卸载再加荷时的弹性模量指数  $n_{ur}$ 。由于在施工期的筑坝过程及完工后的蓄水过程中,黄土坝壳始终处在荷载状态,且黄土颗粒为散粒体材料,故  $K_{ur}$ 、 $n_{ur}$ 、 $c$  在敏感性分析时不参与讨论,同时将影响大坝变形的坝料容重  $\gamma$  加入敏感性分析的试验因素中<sup>[15]</sup>。

由于极差分析法具有一定的局限性,不能区分试验结果的差异具体是由什么因素引起<sup>[18]</sup>,因此本文采用的两种试验设计方法的试验结果均采用方差分析法进行分析。在  $F$  分布表中查对应的  $F_{0.01}$ 、 $F_{0.05}$ 、 $F_{0.1}$ 、 $F_{0.2}$  值,并与计算得到的检验敏感性统计量  $F_i$  值比较,判断因素的显著性水平。若  $F_i > F_{0.01}$ ,说明该因素高度显著,记为 \*\*;若  $F_{0.01} > F_i > F_{0.05}$ ,说明该因素显著,记为 \*;若  $F_{0.1} > F_i$ ,说明该因素有影响;若  $F_{0.1} > F_i > F_{0.2}$ ,说明该因素有一定影响;若  $F_{0.2} > F_i$ ,说明该因素无影响<sup>[18]</sup>。

## 1.1 部分因子设计

因子设计在各类试验中广泛应用,常用于探究各因素对试验指标的影响是否显著。全设计是指各个因子所有水平组合的设计。全设计的优点是能够考虑所有试验因子的主效应以及全部因子之间的交互作用,缺点是因子数量越多,所有的水平组合数就会急速增加,如5个因子,每个因子取两个水平,其所有的组合数高达32次。由于试验经费、资源、时间等有限,且高阶项之间的交互作用往往可以忽略,因此试验者只能选取全设计中的一部分,称为部分因子设计<sup>[19]</sup>。

## 1.2 中心复合设计

在试验中,常常需要研究自变量变化引起响应量变化的程度,从而可以找到自变量变化的规律,使得响应变量达到最佳值。通常的做法是先用两个水平的因子试验数据,拟合一个线性回归方程。其模型为(以两个自变量为例):

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_{11} X_1^2 + \alpha_{22} X_2^2 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $Y$ 为响应变量; $\alpha_0$ 为常量; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{22}$ 、 $\alpha_{12}$ 为系数; $X_1$ 、 $X_2$ 为自变量; $\varepsilon$ 为误差项<sup>[20]</sup>。

由于自变量平方项的存在,需要补充试验点,最常用的方法就是中心复合设计。

中心复合设计包含1个中心点(图1中圆形点),用于提供一致精度和纯误差的估计,其各点的三维坐标皆为0;6个轴向点(图1中三角形点),用于估计纯平方项,除了一个坐标 $\pm\alpha$ 外,其余坐标皆为0;8个立方体点(图1中星形点),各点坐标为1或-1,用于组成因子试验的部分<sup>[20]</sup>。

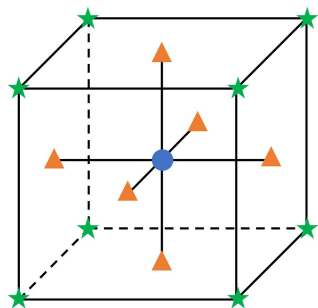


图1 中心复合设计布点示意图

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

某水库大坝工程位于黄土土质地区,地形起伏不大,为中山丘陵地区。该大坝坝顶高程1557.00 m,最大坝高96 m,防浪墙顶高程为1558.20 m,大坝全长575 m。库区正常蓄水位为1554.00 m,库容4587万 $m^3$ 。大坝河床典型剖面如图2所示。

### 2.2 有限元模型

#### 2.2.1 模型计算坐标系

规定河流流动方向为 $x$ 轴,且向下游为正,向上游为负;竖直方向为 $z$ 轴,且向上为正,向下为负;坝轴线方向为 $y$ 轴,且右岸指向左岸为正,左岸指向右岸为负。取计算模型最左下端为 $x$ 轴零点,右岸坝轴线端为 $y$ 轴零点,模型底部高程1216 m为 $z$ 轴零点。

#### 2.2.2 模型边界范围

在 $z$ 轴方向上,从大坝建基面高程1466 m处再垂直向下取2.5倍坝高(250 m)作为地基,高程1216 m处为模型的下边界;在 $x$ 轴方向上,从大坝上游坝脚处向 $x$ 轴负坐标方向取2倍坝高,约为200 m处为模型的上游边界,从大坝下游坝脚处向 $x$ 轴正坐标方向取2倍坝高,约为200 m处为下游边界;在 $y$ 轴方向上,取大坝厚度为100 m。

#### 2.2.3 模型约束

位移约束分别加在地基 $x$ 轴方向两侧与 $y$ 轴方向两侧,分别约束 $y$ 和 $x$ 轴方向位移。底部约束加在计算模型底部的平面上,约束模型底部的 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴方向位移。该均质黄土坝三维有限元计算网格如图3所示。

### 2.3 计算参数

该土坝材料包括坝体填筑料(黄土)、上下游开挖料盖重、反滤排水层等,参与有限元计算的材料的本构模型采用邓肯-张E-B模型。地基及坝体各料区的计算参数取值如表1所示,其中 $c$ 和 $K_{ur}$ 虽不参与敏感性分析,但在实际静动力计算中需要用到。

### 2.4 分级加载过程

该土石坝工程建造过程共分18级加载完成坝体填筑和蓄水。分级加载及蓄水过程如表2所示。

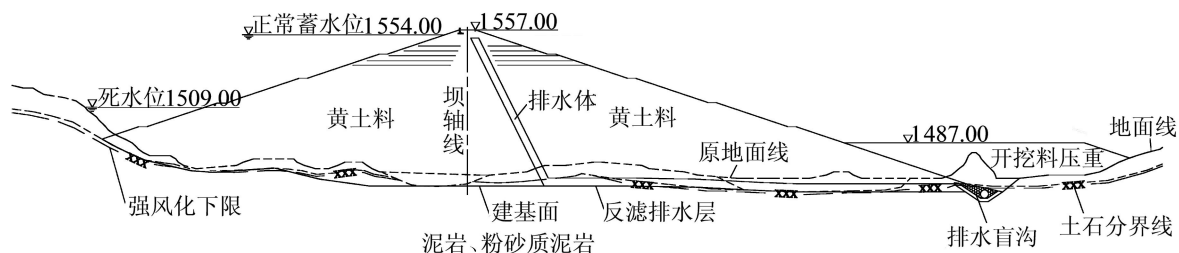


图2 河床段大坝典型剖面(单位:m)

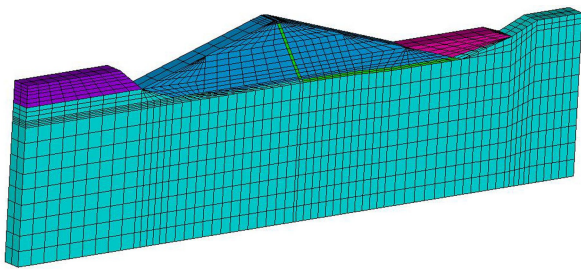


图3 三维有限元计算网格

表1 坝体填筑材料计算参数

坝料	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$K$
坝基微新泥岩	23	240	36	6.00	650
坝基强风化泥岩	21	65	16		350
坝体填筑料(黄土)	18	20	28	5.50	440
上下游开挖料盖重	17	18	24		280
反滤排水层	20	0	36	3.50	800

坝料	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$K_{ur}$
坝基微新泥岩	0.61	0.75	480	0.36	820
坝基强风化泥岩	0.45	0.85	180	0.25	525
坝体填筑料(黄土)	0.60	0.80	280	0.40	525
上下游开挖料盖重	0.40	0.85	180	0.25	525
反滤排水层	0.55	0.80	420	0.60	960

表2 有限元计算分级加载及蓄水过程

分级加载序号	加载说明	坝体高程或水位/m	分级加载序号	加载说明	坝体高程或水位/m
1	覆盖层及地基	557	10	坝体	1530
2	开挖回填	1461	11	坝体	1545
3	坝体	1467	12	坝体	1552
4	坝体	1478	13	坝体	1557
5	坝体	1487	14	坝体	1589
6	坝体	1495	15	蓄水	1509
7	坝体	1505	16	蓄水	1524
8	坝体	1513	17	蓄水	1539
9	坝体	1522	18	蓄水	1554

## 2.5 计算结果分析

计算时为了仅保留单元应力获得地基初始应力场,在加载时首先加载基岩和覆盖层,并在分级加载前将结点位移初始化为0。通过有限元模型计算大坝竣工期及运行期工况下的坝体典型剖面的位移分布如图4所示。

从总体来看,该土坝断面位移变化符合规律。在竣工期,坝体水平位移近似关于坝轴线呈对称分布。水平位移最大值为411.02 mm,发生于下游坝体处,垂直位移最大值为950.47 mm,发生在坝轴线附近距离坝基面约3/4坝高处。在运行期,由于库区蓄水,上游面水压力逐渐增大,在水平方向上坝体向下游变形逐渐增大,向上游变形逐渐减小,水平位移最大值为485.41 mm;在竖直方向上,坝体变形呈均匀下降趋势,垂直位移最大值为989.68 mm,最大值在坝体距离坝基面约2/3坝高处。运行期坝体垂直位移最大值约占最大坝高的1.03%。

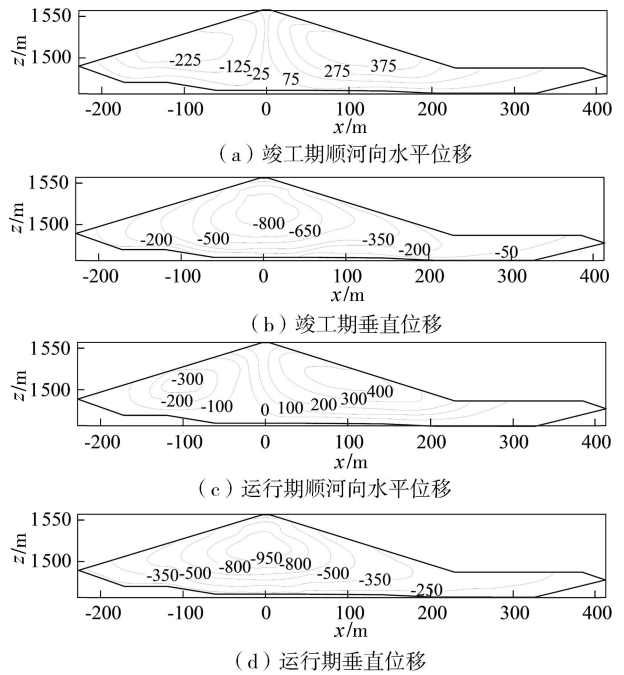


图4 典型断面位移分布(单位:mm)

## 3 敏感性分析

### 3.1 部分因子设计

对 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K$ 、 $n$ 、 $R_f$ 、 $K_b$ 、 $m$ 、 $\Delta\varphi$  8个参数进行部分因子设计,试验指标为垂直位移 $V$ ,向上游水平位移 $H_1$ 和向下游水平位移 $H_2$ 。8个参数作为8个因素,每个因素考察低(-1)和高(1)两个水平,其中低水平为设计参数的0.8倍,高水平为设计参数的1.2倍,各因素及水平如表3所示。

表3 部分因子设计因素水平

水平	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi_0/(\text{°})$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\Delta\varphi/(\text{°})$
-1	14.4	22.4	352	0.48	0.64	224	0.32	4.4
1	21.6	33.6	528	0.72	0.96	336	0.48	6.6

为保证充足的试验次数以便分析出8个参数的显著性程度,设计一个16次试验的部分因子试验方案。具体试验方案及计算结果如表4所示,方差分析结果如表5所示。

从表5可以看出,各参数对 $V$ 的敏感性排序依次为 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$ 、 $n$ 、 $m$ 、 $\Delta\varphi$ ,其中对 $V$ 影响显著的是 $R_f$ 。各参数对 $H_1$ 的敏感性排序为 $R_f$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma$ 、 $K$ 、 $n$ 、 $K_b$ 、 $\Delta\varphi$ 、 $m$ ,其中对 $H_1$ 影响明显显著的是 $R_f$ ,显著的是 $\varphi_0$ 。各参数对 $H_2$ 的敏感性排序为 $R_f$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma$ 、 $K_b$ 、 $K$ 、 $\Delta\varphi$ 、 $m$ 、 $n$ 。

综合来看,各参数对 $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 的敏感性排序虽有不同,但总体上差异不大,其中 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$ 对均质黄土坝位移的影响更加显著,而 $\Delta\varphi$ 、 $m$ 、 $n$ 对均质黄土坝的位移影响不大。

表4 部分因子设计方案

方案	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	$V/mm$	$H_1/mm$	$H_2/mm$
1	14.4	22.4	352	0.48	0.64	224	0.32	4.4	1029.00	397.42	528.99
2	21.6	22.4	352	0.48	0.64	336	0.48	6.6	1016.97	594.91	792.00
3	14.4	33.6	352	0.48	0.96	224	0.48	6.6	1680.52	444.33	572.21
4	21.6	33.6	352	0.48	0.96	336	0.32	4.4	2129.86	641.75	897.24
5	14.4	22.4	528	0.48	0.96	336	0.48	4.4	1315.34	526.29	766.54
6	21.6	22.4	528	0.48	0.96	224	0.32	6.6	6290.91	1408.69	5888.46
7	14.4	33.6	528	0.48	0.64	336	0.32	6.6	575.37	156.02	215.31
8	21.6	33.6	528	0.48	0.64	224	0.48	4.4	858.53	203.22	294.98
9	14.4	22.4	352	0.72	0.96	336	0.32	6.6	1776.98	703.83	1038.53
10	21.6	22.4	352	0.72	0.96	224	0.48	4.4	6733.56	1202.05	7917.50
11	14.4	33.6	352	0.72	0.64	336	0.48	4.4	518.36	182.45	239.69
12	21.6	33.6	352	0.72	0.64	224	0.32	6.6	1011.03	217.01	334.02
13	14.4	22.4	528	0.72	0.64	224	0.48	6.6	805.60	254.70	351.64
14	21.6	22.4	528	0.72	0.64	336	0.32	4.4	809.68	277.94	396.99
15	14.4	33.6	528	0.72	0.96	224	0.32	4.4	1221.22	235.62	329.48
16	21.6	33.6	528	0.72	0.96	336	0.48	6.6	1440.33	341.83	425.20

表5 部分因子试验方差分析结果

因素	$F_i$							
	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\Delta\varphi/(^\circ)$
$V$	3.60	2.98	0.19	0.01	7.10*	2.81	0.01	0.00
$H_1$	4.72	10.37*	1.15	1.10	12.41**	1.05	0.10	0.25
$H_2$	2.59	3.21	0.21	0.02	3.35	2.04	0.05	0.05

### 3.2 响应面分析

根据上述部分因子设计试验筛选出对均质黄土坝位移影响显著的参数包括  $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$ ，对这5个参数进行中心复合设计，研究  $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$  这5个参数之间两两交互的影响。由于三阶及四阶交互效应显著性太小，在此不予分析。每个参数设计3个水平，高水平(1)取试验设计参数的1.2倍，低水平(-1)取试验设计参数的0.8倍。各因素及水平如表6所示，中心复合设计试验方案及计算结果如表7所示。

表6 中心复合设计试验因素水平取值

水平	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$R_f$	$\varphi_0/(^\circ)$	$K_b$	$K$
-1	14.4	0.64	22.4	224	352
0	18.0	0.80	28.0	280	440
1	21.6	0.96	33.6	336	528

根据各试验方案的计算结果再计算  $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$  这5个参数以及参数之间二阶交互效应的方差大小。对表7数据结果进行方差分析，垂直位移、向上游位移、向下游位移的方差分析结果如表8所示。可以看出，对  $V$  的敏感性程度由高到低次序为  $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma R_f$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $\gamma \varphi_0$ 、 $KK_b$ 、 $\varphi_0^2$ 、 $R_f^2$ 、 $K_b^2$ 、 $K_b$ 、 $K$ 、 $K^2$ 、 $\gamma^2$ 、 $KR_f$ 、 $\gamma K$ 、 $\varphi_0 K_b$ 、 $R_f K_b$ 、 $\gamma K_b$ 、 $\varphi_0 K$ ，其中  $R_f$  明显显著， $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma R_f$  显著。对  $H_1$  的敏感性程度由高到低次序为  $\varphi_0$ 、 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0^2$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $\gamma R_f$ 、 $K$ 、 $K_b$ 、 $\gamma \varphi_0$ 、 $R_f K_b$ 、 $KK_b$ 、 $R_f^2$ 、 $K^2$ 、 $\gamma K_b$ 、 $\gamma^2$ 、 $KR_f$ 、 $\varphi_0 K$ 、 $\varphi_0 K_b$ 、 $K_b^2$ 、 $\gamma K$ ，其中

表7 中心复合设计试验方案

方案	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$\varphi_0/(^\circ)$	$K$	$R_f$	$K_b$	$V/mm$	$H_1/mm$	$H_2/mm$
1	14.4	22.4	352	0.64	336	740.87	342.67	452.50
2	21.6	22.4	352	0.64	224	1227.16	519.72	727.67
3	14.4	33.6	352	0.64	224	766.22	202.93	279.92
4	21.6	33.6	352	0.64	336	714.61	261.53	353.17
5	14.4	22.4	528	0.64	224	858.56	268.09	369.79
6	21.6	22.4	528	0.64	336	837.03	339.53	476.21
7	14.4	33.6	528	0.64	336	512.77	136.59	189.13
8	21.6	33.6	528	0.64	224	901.41	169.65	257.16
9	14.4	22.4	352	0.96	224	2003.15	866.92	1254.75
10	21.6	22.4	352	0.96	336	4867.27	1287.13	4588.97
11	14.4	33.6	352	0.96	336	1327.81	354.29	454.54
12	21.6	33.6	352	0.96	224	2639.50	834.79	2086.92
13	14.4	22.4	528	0.96	336	1318.21	509.43	769.14
14	21.6	22.4	528	0.96	224	4472.15	1429.97	2074.24
15	14.4	33.6	528	0.96	224	1236.61	270.09	371.94
16	21.6	33.6	528	0.96	336	1522.11	356.68	467.05
17	10.8	28.0	440	0.80	280	659.98	231.95	315.79
18	25.2	28.0	440	0.80	280	1095.10	529.00	675.52
19	18.0	16.8	440	0.80	280	1736.49	1069.99	1560.01
20	18.0	39.2	440	0.80	280	711.43	204.18	282.78
21	18.0	28.0	264	0.80	280	1025.22	547.17	731.83
22	18.0	28.0	616	0.80	280	822.03	264.82	371.76
23	18.0	28.0	440	0.48	280	678.82	167.54	230.63
24	18.0	28.0	440	1.12	280	1536.62	681.30	1194.71
25	18.0	28.0	440	0.80	168	1269.43	398.50	548.95
26	18.0	28.0	440	0.80	392	707.10	312.40	427.41
27	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
28	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
29	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
30	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
31	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48
32	18.0	28.0	440	0.80	280	883.93	344.64	481.48

$\varphi_0$ 、 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0^2$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $\gamma R_f$ 、 $K$  明显显著， $K_b$ 、 $\gamma \varphi_0$  显著。对  $H_2$  的敏感性程度由高到低次序为  $R_f$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma$ 、 $\gamma R_f$ 、 $K$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $KR_f$ 、 $\gamma K$ 、 $\varphi_0^2$ 、 $\varphi_0 K_b$ 、 $\gamma \varphi_0$ 、 $KK_b$ 、 $R_f^2$ 、 $K^2$ 、 $\varphi_0 K$ 、 $\gamma^2$ 、 $\gamma K_b$ 、 $K_b^2$ 、 $R_f K_b$ 、 $K_b$ ，其中  $R_f$ 、 $\varphi_0$ 、 $\gamma$ 、 $\gamma R_f$  明显显著， $K$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $KR_f$ 、 $\gamma K$  显著。

表 8 垂直位移、向上游位移、向下游位移的方差分析

因素	$F_i$			因素	$F_i$		
	$V$	$H_1$	$H_2$		$V$	$H_1$	$H_2$
$\gamma$	9.07*	37.16**	14.47**	$\gamma\varphi_0$	3.26	5.98*	3.72
$\varphi_0$	8.06*	102.00**	19.38**	$\gamma K$	0.10	0	5.24*
$K$	0.97	14.16**	8.83*	$\gamma R_f$	7.32*	16.96**	12.80**
$R_f$	22.25**	101.46**	29.63**	$\gamma K_b$	0.02	1.36	0.50
$K_b$	1.21	6.05*	0	$\varphi_0 K$	0	0.44	0.78
$\gamma^2$	0.75	0.95	0.51	$\varphi_0 R_f$	4.21	17.19**	7.12*
$\varphi_0^2$	2.60	21.37**	4.51	$\varphi_0 K_b$	0.07	0.39	4.31
$K^2$	0.93	1.78	0.81	$KR_f$	0.60	0.91	6.55*
$R_f^2$	1.85	2.55	2.05	$KK_b$	2.91	2.63	2.67
$K_b^2$	1.22	0.38	0.47	$R_f K_b$	0.02	4.57	0.16

因为  $\gamma R_f$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $\gamma\varphi_0$  参数之间对于大坝位移有显著的交互作用,以下通过绘制等值线图(图 5~7)做进一步分析。

由图 5 可知,当保持  $\varphi_0 = 28^\circ$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$  时,在  $\gamma$  处于高水平时, $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  随着  $R_f$  的增大而增大且等值线密集,说明此时  $R_f$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $\gamma$  的减小而减弱;在  $R_f$  处于高水平时, $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  随着  $\gamma$  的增大而增大

且等值线密集,说明此时  $\gamma$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $R_f$  的减小而减弱。除此之外,可以发现,云图呈弧度过渡,而不是简单的线性过渡,这进一步说明  $\gamma$  与  $R_f$  之间存在一定的交互作用,且共同影响  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化。

由图 6 可知,当保持  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$  时,在  $\varphi_0$  处于低水平时, $R_f$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $\varphi_0$  的增大而减弱;在  $R_f$  处于高水平时, $\varphi_0$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $R_f$  的减小而减弱。 $\varphi_0$  与  $R_f$  之间存在一定的交互作用,且共同影响  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化。

由图 7 可知,当保持  $R_f = 0.8$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$  时,在  $\gamma$  处于高水平时, $\varphi_0$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $\gamma$  的减小而减弱;在  $\varphi_0$  处于低水平时, $\gamma$  的变化对  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化影响更加显著,显著性随着  $\varphi_0$  的增大而减弱。 $\gamma$  与  $\varphi_0$  之间存在一定的交互作用,且共同影响  $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  的变化。

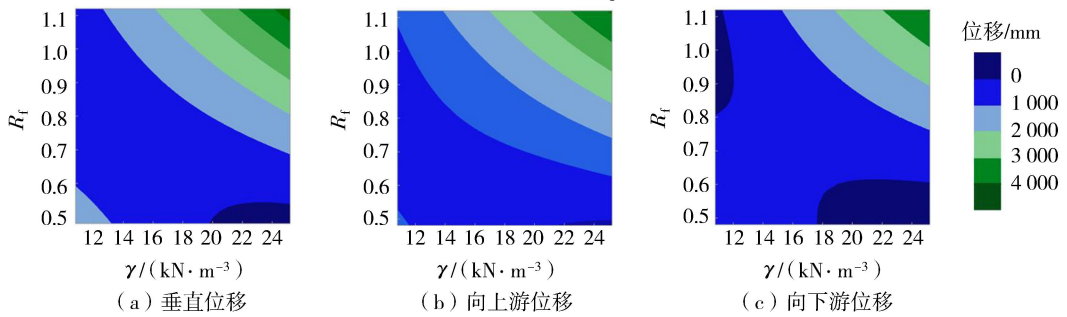


图 5  $\gamma R_f$  位移等值线 ( $\varphi_0 = 28^\circ$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$ )

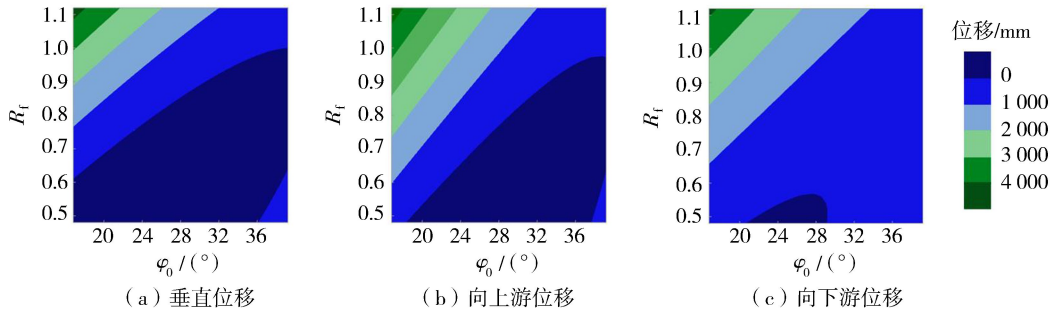


图 6  $\varphi_0 R_f$  位移等值线 ( $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$ )

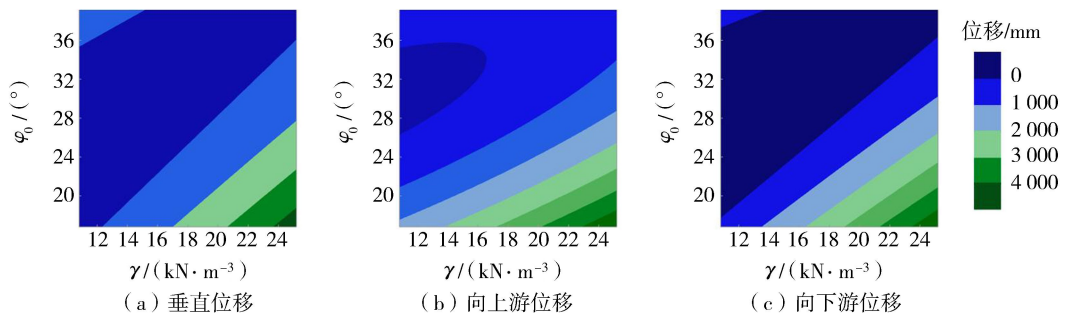


图 7  $\gamma\varphi_0$  位移等值线 ( $R_f = 0.8$ 、 $K = 440$ 、 $K_b = 280$ )

## 4 结 论

a. 整体来看,该均质黄土坝的变形分布符合一般规律:在竣工期坝体水平位移分布近似关于坝轴线呈对称分布。在运行期坝体蓄水后,在坝体自重和上游水压力的共同作用下,水平位移分布规律由对称分布逐渐向下游变形,垂直位移呈现均匀下降趋势。

b. 8个参数中对土坝变形影响较为显著的5个参数为 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 、 $K_b$ 、 $K$ 。 $R_f$ 、 $\gamma$ 、 $\varphi_0$ 是对大坝位移敏感性最强的3个参数, $\gamma R_f$ 、 $\varphi_0 R_f$ 、 $\gamma \varphi_0$ 参数之间的交互作用对于大坝位移的敏感性也不可忽视。

c. 当 $R_f$ 位于高水平时, $\gamma$ 和 $\varphi_0$ 的变化对 $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 的变化影响更加显著;当 $\gamma$ 位于高水平时, $R_f$ 和 $\varphi_0$ 的变化对 $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 的变化影响更加显著;当 $\varphi_0$ 位于低水平时, $R_f$ 和 $\gamma$ 的变化对 $V$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 的变化影响更加显著。

### 参考文献:

[1] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等. 土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 1-10. (YUAN Junping, QIU Haolei, HU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 1-10. (in Chinese))

[2] 王安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 48-55. (in Chinese))

[3] 程展林,潘家军. 土石坝工程领域的若干创新与发展[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 1-10. (CHENG Zhanlin, PAN Jiajun. Some innovations and developments in the field of earth-rock dam engineering[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 1-10. (in Chinese))

[4] 赵晓龙,朱俊高,王平. 两种本构模型的土石坝应力变形分析比较[J]. 中国农村水利水电, 2018(1): 165-169. (ZHAO Xiaolong, ZHU Jungao, WANG Ping. A comparison of two constitutive models in stress and deformation analysis of earth rockfill dams [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(1): 165-169. (in Chinese))

[5] 黄焜,蔡德所,涂小龙. 猴子岩超高面板堆石坝应力和位移非线性有限元分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36

(5): 57-60. (HUANG Kun, CAI Desuo, TU Xiaolong. Nonlinear finite element analysis of stress and displacement of Houziyan high concrete face rockfill dam [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(5): 57-60. (in Chinese))

[6] 汪天飞,徐青. 基于邓肯-张模型的堆石坝有限元分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(10): 151-155. (WANG Tianfei, XU Qing. Finite element analysis of rock-filled dams based on Duncan-Chang model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(10): 151-155. (in Chinese))

[7] 姜海波. 复合土工膜心墙与斜墙高土石坝应力应变研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(1): 53-57. (JIANG Haibo. Stress and strain of high earth-rock dam with composite geomembrane core-wall and inclined-wall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(1): 53-57. (in Chinese))

[8] 马春景,姜谔男,白冰,等. 三轴试验确定邓肯-张模型参数及其在FLAC<sup>3D</sup>中的应用[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(4): 113-118. (MA Chunjing, JIANG Annan, BAI Bing, et al. Method of determining parameters of Duncan-Chang model based on triaxial test and its application in FLAC<sup>3D</sup> [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(4): 113-118. (in Chinese))

[9] 陈家琦,岑威钧,李邓军,等. 基于改进ACMPSO并行算法的土石坝本构参数反演[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 66-71. (CHEN Jiaqi, CEN Weijun, LI Dengjun, et al. Inversion of constitutive parameters of earth-rock dams based on improved ACMPSO parallel algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 66-71. (in Chinese))

[10] 陆周祺. 基于免疫遗传算法的堆石坝流变反演分析[J]. 人民长江, 2019, 50(4): 194-200. (LU Zhouqi. Back analysis on rheological deformation of core rockfill dam based on Immune Genetic Algorithm [J]. Yangtze River, 2019, 50(4): 194-200. (in Chinese))

[11] 贾宇峰,朱茂林,迟世春. 基于变异粒子群算法的大坝土料流变参数反演:以观音岩混合坝为例[J]. 人民长江, 2017, 48(14): 73-78. (JIA Yufeng, ZHU Maolin, CHI Shichun. Back-analysis of creep deformation parameters of Guanyinyan composite dam based on parallel mutation particle swarm optimization [J]. Yangtze River, 2017, 48(14): 73-78. (in Chinese))

[12] 周郊鹏,柴军瑞,雷艳. 黑河金盆水库坝区三维渗控效应评价与材料参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 207-215. (ZHOU Binpeng, CHAI Junrui, LEI Yan. Simulation of seepage control effect and sensitivity analysis of material parameters at dam site of Heihe Jinpen Reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1): 207-215. (in Chinese))

(下转第81页)

# 掺水泥粉土的改良风积沙三轴压缩特性

刘万乐<sup>1</sup>, 田正宏<sup>1</sup>, 鲁洋<sup>1</sup>, 许健<sup>2</sup>, 巩转定<sup>3</sup>, 吴彦军<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃兰州 730070;  
3. 甘肃水利工程地质建设责任有限公司, 甘肃兰州 730014)

**摘要:**基于单掺5%水泥的经济性设计指标,开展了混掺水泥粉土的改良风积沙三轴压缩试验,分析了改良风积沙试样不同围压下的应力-应变及强度特性,揭示了不同掺比改良风积沙黏聚力和内摩擦角的变化规律,以及改良风积沙的破坏形式及剪切破坏机理。结果表明:改良风积沙的应力-应变关系曲线均为应变软化型曲线;弹性模量和破坏强度与围压正相关,弹性模量在粉土掺量增至15%时达到峰值;破坏强度与粉土掺量正相关;10%粉土掺量下改良风积沙黏聚力最大,内摩擦角则随粉土掺量增加而单调增长。水泥水化物包裹在沙粒表面,增加了沙粒表面粗糙度,并在沙粒之间的空隙形成网状结构,将沙粒联结起来,阻碍沙粒相对运动;掺入适量粉土可填充沙粒和水化物之间的空隙,但过量粉土会制约水化反应,同时碱性离子与水化物反应产生胶结能力差的硅酸钠和铝酸钠,导致改良风积沙整体性能下降。

**关键词:**风积沙;水泥粉土;改良土;黏聚力;内摩擦角;破坏形态;三轴压缩试验

**中图分类号:**TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0051-07

**Study on triaxial compression characteristics of improved aeolian sand mixed with cement silt//LIU Wanle<sup>1</sup>, TIAN Zhenghong<sup>1</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, XU Jian<sup>2</sup>, GONG Zhuanding<sup>3</sup>, WU Yanjun<sup>3</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Water Conservancy Engineering Geology Construction Co., Ltd., Lanzhou 730014, China)**

**Abstract:** Based on the economic design index of single 5% cement, the triaxial test of improved aeolian sand static in mixed cement silt was carried out. The stress-strain and strength characteristics of improved aeolian sand sample under different confining pressures were analyzed, based on which the change law of the viscosity and internal friction angle of different doping ratios, the failure form of improved aeolian sand, and the shear failure mechanism were revealed. The main results show the stress-strain relationship curves of improved aeolian sand are all strain softening curves. The elastic modulus and failure intensity are positively correlated with confining pressure, and elastic modulus reaches to its peak value when the amount of silt mixing is increased to 15%. The value of failure intensity is positively correlated with the amount of silt. The cohesion of modified aeolian sand is the largest under 10% silt mixture, and the internal friction angle increases monotonously with silt mixing amount. The reason is that cement hydrate is wrapped in the surface of sand particles, increasing the surface roughness and forming a network structure in the gap between sand particles. The sand particles are linked together and the relative movement of sand grains is hindered. Incorporating an appropriate amount of silt can fill the gaps between sand particles and hydrates, but excessive silt will restrict the hydration reaction, and at the same time, alkaline ions and hydrates react to produce sodium silicate and sodium aluminate with poor cementing capacity, resulting in a decrease in the overall performance of improved aeolian sand.

**Key words:** aeolian sand; cement silt; improved soil; cohesion; internal friction angle; destruction morphology; triaxial test

风积沙广泛分布于我国西北地区<sup>[1]</sup>,存在级配差、抗剪性能差、易液化、抗震性差、成型困难等诸多缺陷,因此直接作为建筑材料应用于水利工程会导致坝体的强度、抗震性能、抗渗性能等都不满足规范要

求<sup>[2]</sup>。为了能在西北地区工程建设中利用当地材料,降低工程成本,有必要对风积沙进行改良研究。

目前风积沙改良分为单掺和混掺,单掺的掺入物常为水泥、粉土、纤维等。任辉明等<sup>[3-4]</sup>研究发现

改良风积沙的强度与养护龄期正相关;水泥掺量过高,风积沙会向脆性材料发展,实际工程中水泥掺量应控制在5%左右。胡三喜等<sup>[5-6]</sup>研究了粉土改良风积沙在路基工程的应用效果,发现粉土掺入风积沙后,碾压效果明显提高;松铺厚度随粉土掺量的增大而减小,施工方便且节省成本。张达德等<sup>[7-9]</sup>探究了土工格室对风积沙的改良效果,发现土工格室加固沙漠路基具有明显的分散荷载作用,使沙基所受应力、应变均匀;显著提高沙基的抗剪强度和承载能力;一定范围内土工格室越高、层数越多,承载能力越大,但成本相对粉土和水泥略有提高;Gray等<sup>[10]</sup>通过研究土工织物加筋沙和纤维加筋沙发现,2种加筋方式均可以提高沙的抗剪性能,并减少损失残余强度;土工织物加筋沙小应变时发生刚度损失,最终破坏面在加筋层之间,而纤维沙初始小应变无刚度损失,破坏面为经典平面。Santoni等<sup>[11-12]</sup>研究发现沙土中掺入随机分布的纤维可以提高材料的强度,最佳的纤维长度为51mm,最佳的纤维掺量在0.6%~1.0%之间。关于混掺改良研究,李德超<sup>[13]</sup>认为石灰、粉煤灰的掺入可以提高风积沙的强度,适宜的二灰比为1:3~1:4。胡玉娇等<sup>[14-15]</sup>同时运用石灰、粉煤灰和纤维来提高风积沙在道路工程中的稳定性,试验表明该种改良方式可以同时提高材料的抗压、抗拉和抗收缩性能。Chauhan等<sup>[16]</sup>研究了椰壳纤维和合成纤维对沙土路基强度的影响,结果表明加入纤维后,沙土的弹性应变和塑性应变均随围压增大而减小,弹性模量随围压增加而增大。

综上所述,单掺改良风积沙相对更方便,但对风积沙性能提升相对单一;混掺改良风积沙可以提高风积沙多种力学性能,但部分掺入物成本相对较高。目前改良风积沙主要应用在道路建设中,且研究方向多为风积沙的路用性能,而对改良风积沙筑坝性能研究较少。相比道路,筑坝风积沙应能够承受更大的围压,有更好的抗剪性能、更高的强度和更好的抗震性,如李佳杰等<sup>[17]</sup>通过直剪试验对改良风积沙抗剪性能进行了初步研究。本文通过三轴试验研究不同水泥和粉土掺比下改良风积沙的抗剪强度变化和不同围压下改良风积沙强度变化规律,并结合微观图像进行机理分析,阐述堤坝填筑采用混掺风积沙的可行性,以期能为设计施工提供参考。

## 1 试验材料

### 1.1 风积沙

试验所用风积沙为古浪县黄花滩蓄水池工程现场用沙,沙粒较细,所有粒径小于0.5mm,粒径集中在0.25~0.075mm之间(占总质量91.5%),不均

匀系数 $C_u = 1.725$ ,曲率系数 $C_c = 0.852$ ,有效粒径 $d_{10} = 0.080$ mm,中间粒径 $d_{30} = 0.097$ mm,界限粒径 $d_{60} = 0.138$ mm。风积沙级配曲线如图1所示,由图1可知其级配不良。

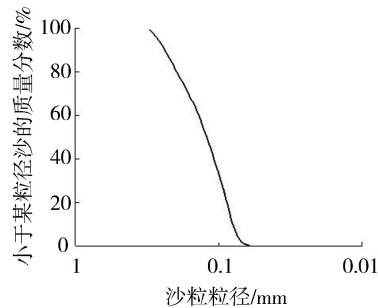


图1 风积沙级配曲线

### 1.2 粉土、水泥

粉土取自黄花滩蓄水池工程料场冲洪积粉土,主要性能参数:沙砾、粉粒、黏粒的质量分数分别为10.75%、76.91%和12.35%,相对密度为2.73,液限为25.09%,塑限为13.66%,塑性指数为7.6,密度为1.7g/cm<sup>3</sup>,最大干密度为1.86g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为13.4%,pH值为9.1~9.7。水泥为海螺牌普通硅酸盐水泥P·O42.5,细度为1.35%,密度为3.1g/cm<sup>3</sup>,28d抗压强度为45.5MPa。

## 2 试验方案

研究<sup>[18]</sup>表明,风积沙单掺5%水泥时,不仅能满足96%压实度和0.80相对密度的施工要求,而且相比更高水泥掺量,5%水泥掺量更经济;粉土掺量超过9%时可显著提高风积沙干密度,粉土掺量超过20%后,干密度提高效果不明显,且经济性降低,因此本文选取纯风积沙(方案1)、5%水泥改良风积沙(方案2)、5%水泥+10%粉土改良风积沙(方案3)、5%水泥+15%粉土改良风积沙(方案4)、5%水泥+20%粉土改良风积沙(方案5),进行固结不排水三轴压缩试验。

通过标准击实试验获得改良风积沙最大干密度和最优含水率,并由此确定各种配料的质量,结合工程施工要求,按96%压实度制样,拌好的料在保鲜袋中闷24h,制样前加入水泥搅拌均匀,避免闷料期间水泥水化反应对试样强度造成影响。改良风积沙分5层击实制备圆柱体试样,纯风积沙利用对开模套和橡皮膜在三轴仪压力室底座上分3层制样,试样的直径和高度分别为39.1mm和80mm。通过7d、14d和28d养护龄期改良风积沙的无侧限抗压强度试验发现,养护龄期为14d时改良风积沙强度基本稳定,因此试验采用14d养护龄期。试样采用抽气饱和与水头饱和相结合的方式饱和;利用



TSY-10 型土工三轴试验仪对试样进行力学性能测试,结合黄花滩工程坝体材料受力情况,5 种试验方案均选取 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 3 种围压水平。由于改良风积沙渗透性较好,因此选取试样剪切应变速率为 0.5%/min,持续剪切至试样的轴向应变达到 15%~20%。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 应力-应变特性

由图 2 可知(图中  $\varepsilon_1$  为轴向应变、 $\sigma_1 - \sigma_3$  为主应力差),不同种类风积沙试样破坏过程中应力-应变关系曲线均保持应变软化的特点,试样的应力-应变曲线可分为线弹性阶段、非线性阶段、应变软化阶段和残余强度阶段。

线弹性阶段,随着应力增大,应力-应变近似为线性关系,出现硬化现象;非线性强化阶段,应力逐渐增大至峰值,直线向曲线过渡,应变随应力增大速率不断提高,且围压越大,应变随应力变化相对越小,即强化阶段斜率越大,围压对轴向抗压强度影响越大;应变软化阶段,应力达到峰值后出现应变软化现象,即应力随应变增加而减小,速率先增大后减

小,粉土掺量越多,围压越大,现象越明显;残余强度阶段,随着应变的持续增大,应力逐渐减小,趋于稳定,达到残余强度值;围压越大,残余强度越大。

纯风积沙的应力-应变曲线应变软化不明显,随着掺入水泥和粉土掺量的不断增加,改良风积沙的应力-应变曲线应变软化现象越来越明显。

#### 3.2 弹性模量

工程上常用峰值应力 50% 对应的割线弹性模量  $E$  来研究水泥土变形难易程度,因此本文以弹性模量来描述试样刚度。弹性模量随围压和风积沙种类变化曲线如图 3 所示。

图 3(a) 表明,弹性模量与围压正相关,随着围压的增加,方案 4 相对于其他改良风积沙始终保持最大弹性模量。图 3(b) 表明,同一围压下,随着 5% 水泥掺入和粉土掺量的增加,风积沙的弹性模量先增加后降低,呈现“峰形”变化趋势。掺入 5% 水泥后,弹性模量大幅度提高;掺入 10% 粉土后,弹性模量持续增加,增速减缓;掺入 15% 粉土后,弹性模量有较大的提高,达到最大值;而掺入 20% 粉土后,弹性模量大幅度降低,即适量粉土有利于提高风积沙弹性模量,而过量粉土会降低风积沙弹性模量,存

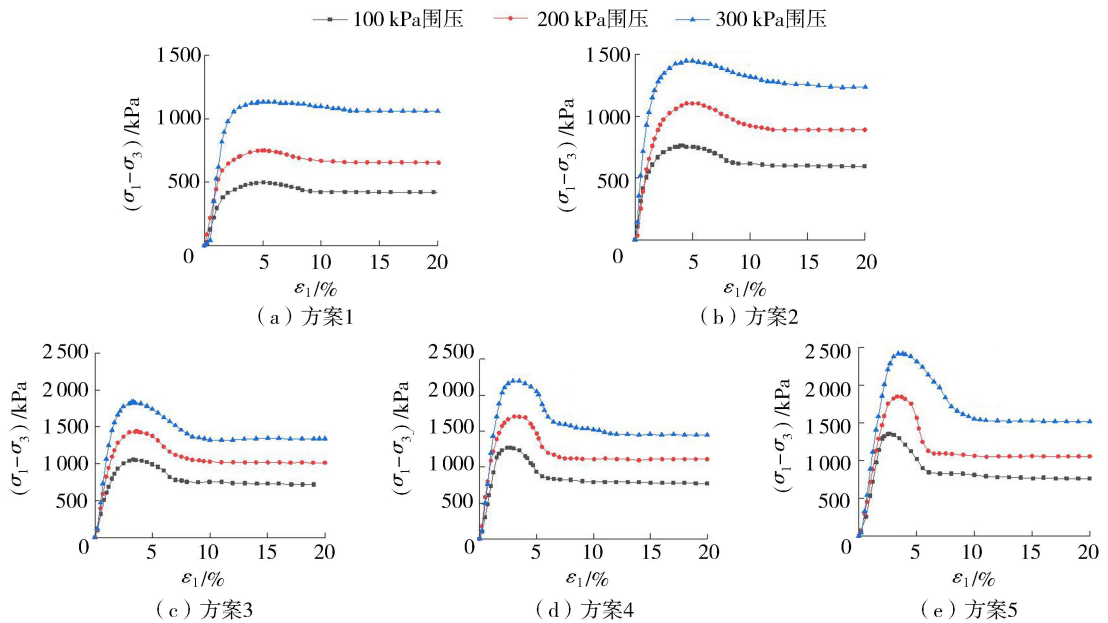


图 2 不同试验方案应力-应变关系曲线

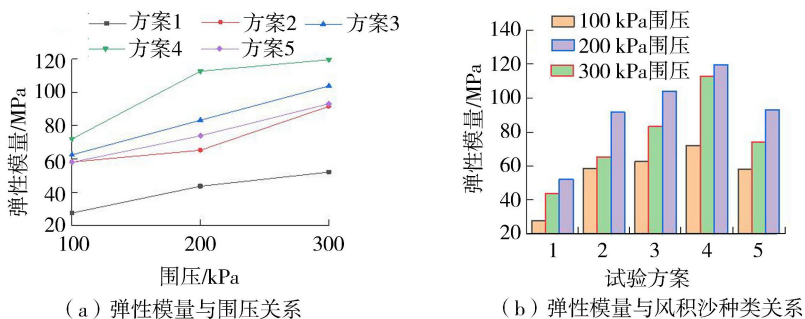


图 3 弹性模量与围压和风积沙种类关系

在一个最佳的粉土掺量(约为15%)。

### 3.3 强度特征

由图2知,不同种类风积沙的应力-应变曲线均呈应变软化型,根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,以 $\sigma_1-\sigma_3$ 的峰值点作为破坏点,对应 $\sigma_1-\sigma_3$ 即为破坏强度 $q_f$ 的值;试样破坏后,应力随应变增加逐渐稳定,取应变达到17%时对应的强度为残余强度 $q_r$ , $q_f$ 和 $q_r$ 与围压和风积沙种类的变化曲线如图4~7所示。

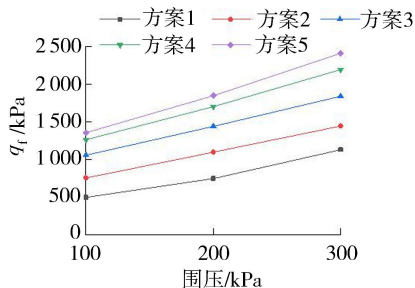


图4 破坏强度随围压变化

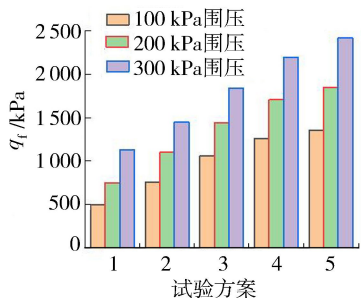


图5 破坏强度与风积沙种类关系

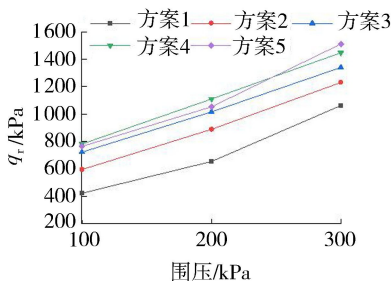


图6 残余强度随围压变化

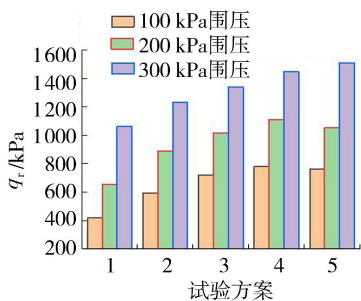


图7 残余强度与风积沙种类关系

由图4可知,同种改良风积沙试样的 $q_f$ 与围压正相关,粉土掺量越大, $q_f$ 随围压的变化速率越大。

由图2可知,轴向应变达到3%~5%时,试样达到 $q_f$ ,且破坏应变随着围压的增大而增大,即随围压的增大结构可以承受更大的变形。由图5可知,掺入5%水泥后, $q_f$ 明显提高,同一围压下, $q_f$ 与粉土掺量正相关,但 $q_f$ 的增速随粉土掺量的增加而逐渐降低。相同粉土增量,围压越大, $q_f$ 增速越大。图6表明,同种改良风积沙试样的 $q_r$ 与围压正相关,说明围压增大有利于提高风积沙的 $q_r$ 。图7表明,掺入5%水泥后, $q_r$ 明显提高;100 kPa和200 kPa围压下 $q_r$ 随粉土掺量的增加先增加后降低,呈现“峰形”,15%粉土掺量 $q_r$ 最大;说明适量的粉土可以改善风积沙的 $q_r$ ,但过量的粉土不利于水泥水化,导致 $q_r$ 降低;300 kPa围压下 $q_r$ 随粉土掺量的增加而增大,增速逐渐降低,这是由于高围压下,围压对残余强度的影响较大,因此当粉土掺量达到20%时,残余强度仍在增加,但增速减缓。

### 3.4 抗剪强度

由图8可知,总黏聚力 $c_{cu}$ 和总内摩擦角 $\varphi_{cu}$ 均大于有效黏聚力 $c'$ 和有效内摩擦角 $\varphi'$ ,但变化趋势一致;这是由于密实的风积沙具有剪胀性,剪切过程中产生负孔隙水压力,使有效围压增加,以保持试样体积不变。由图8(a)所示,掺入5%水泥后, $c'$ 和 $c_{cu}$ 均明显增大,掺入粉土后,随着粉土掺量增加 $c'$ 和 $c_{cu}$ 均先增大后减小,增长速率大于减小速率,粉土掺量10%时 $c'$ 和 $c_{cu}$ 均最大, $c_{cu}$ 达到166 kPa,但 $c_{cu}$ 和 $c'$ 相差越来越大。即5%水泥能够明显提高风积沙的 $c'$ 和 $c_{cu}$ ,适量粉土有利于提高风积沙的 $c'$ 和 $c_{cu}$ ,但过量粉土会降低风积沙的 $c'$ 和 $c_{cu}$ 。由于纯风积沙试样饱和度在试验过程中难以达到95%以上,试样内存在毛细水压力,增加了颗粒间错动的摩擦阻力,产生的效果与黏聚力类似,被称为假黏聚力,受

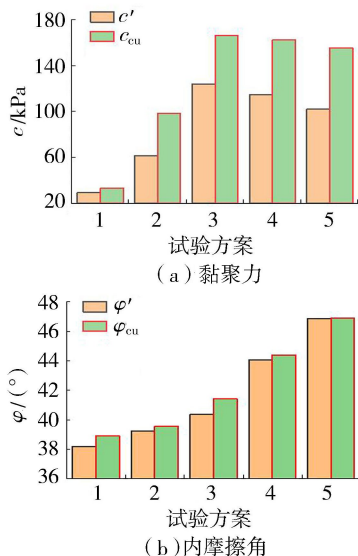


图8 风积沙黏聚力与内摩擦角

到假黏聚力的影响,试验得出纯风积沙表现出较小的黏聚力。由图 8(b)可知,掺入 5% 水泥后, $\varphi_{cu}$  和  $\varphi'$  有小范围增长,掺入粉土后,随着粉土掺量增加  $\varphi_{cu}$  和  $\varphi'$  不断增大,增长速率均先增大后减小,且  $\varphi_{cu}$  和  $\varphi'$  越来越接近。

### 3.5 破坏形态

由图 9 可知,试样破坏后高度明显降低,直径略有增加,整体性好,表面没明显的脱落现象;纯风积沙为膨胀破坏,没有明显的破坏截面,改良风积沙为剪切破坏,破坏截面非常明显。根据摩尔-库仑强度理论可计算得出剪切破坏面与大主应力面之间的夹

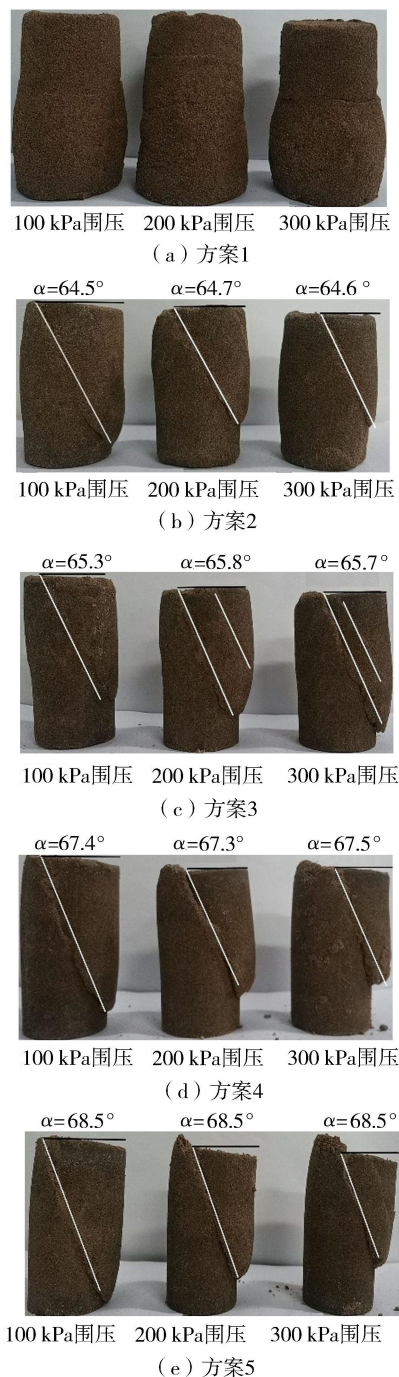


图 9 试样破坏形态

角  $\alpha$ , 计算得出的单掺 5% 水泥和混掺 5% 水泥与 10%、15%、20% 粉土改良风积沙的  $\alpha$  分别为  $64.77^\circ$ 、 $65.7^\circ$ 、 $67.2^\circ$  和  $68.45^\circ$ 。实测  $\alpha$  如图 9 所示。

$\alpha$  实测值与计算值误差相对较小,可忽略;随着粉土掺量的增加  $\alpha$  逐渐增大,这是由于内摩擦角随粉土掺量的增加而增大。图 9 表明,同种改良风积沙,围压越大,破坏面以上的楔形体体积越小;以图 9(c) 为例,围压越大,试样的破坏截面越多越明显。

### 4 机理分析

将 4 种改良风积沙养护好的试样制作成长宽不超过 10 mm,厚度不超过 5 mm 的小试块,烘干后采用 FEI Quanta FEG250 型电子扫描显微镜,对小试块进行表面形貌扫描(图 10、图 11),分析改良风积沙性能变化的机理。

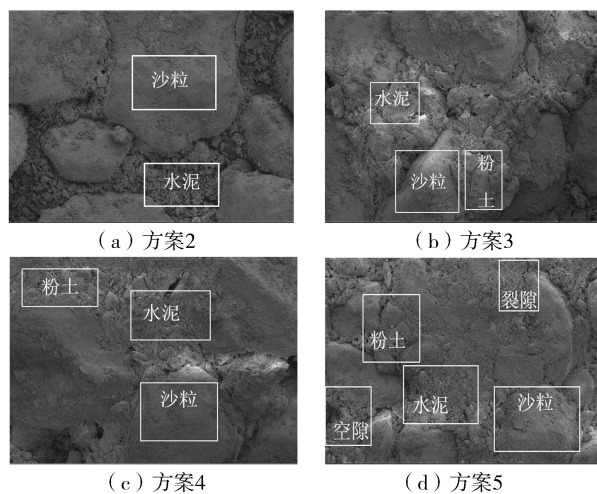


图 10 100  $\mu\text{m}$  下改良风积沙形态

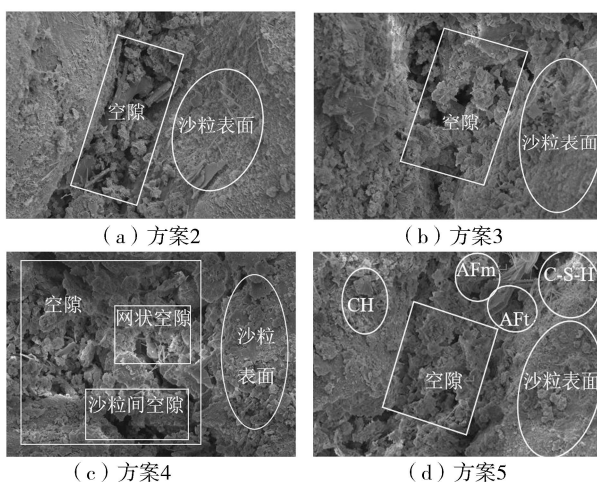


图 11 10  $\mu\text{m}$  下改良风积沙微观形貌

图 10 表明,随着水泥和粉土的掺入,风积沙颗粒之间的空隙逐步得到填充,单掺 5% 水泥填充效果较差,空隙填充率较低;掺入粉土后,水泥水化物包裹着粉土填充空隙,填充效果明显提高,粉土掺量

越大,空隙填充越充分,导致土体压缩变形量减小,压缩性降低,刚度增大;粉土掺量达到 20% 时,沙粒周围仍有明显的空隙和裂缝,沙土颗粒之间有明显的挤压现象,另一方面,粉土承载力较低,压缩性大,过量粉土替换风积沙后,土体压缩变形增大,导致刚度减小。

由图 11(a) 发现,掺入水泥后,沙粒表面被絮状和管状触须的水化硅酸钙 C-S-H 包裹,导致沙粒表面变得粗糙;空隙之间,C-S-H 凝胶体、板状氢氧化钙 CH、晶体钙矾石 AFt 和单硫型水化硫铝酸钙 AFm 相互交错,促使沙粒和水化物联结成整体,提升了沙粒之间的整体抗剪性能以及沙粒表面之间产生的摩擦力,宏观表现为掺入水泥后风积沙  $q_t$ 、黏聚力和内摩擦角均提高。

图 11(b) ~ (d) 表明掺入粉土后,粉土同时对沙粒之间的空隙和 C-S-H、CH、AFt、AFm 形成的网状空隙进行填充,同时 C-S-H 凝胶体包裹在沙粒和土颗粒表面,将粉土颗粒和沙粒联结起来,因此掺入粉土后的沙粒表面更加粗糙。粉土掺入量为 15% 时,沙粒表面附着的 C-S-H 和粉土比粉土掺入量为 10% 时多,而粉土掺入量为 20% 时,沙粒表面附着的 C-S-H 与粉土相对减少,同时可以看到粉土掺入量为 20% 时,沙粒之间的管状触须型 C-S-H 相比粉土掺入量为 15% 时明显减少。由于粉土 PH 值在 9.1 ~ 9.7 之间,粉土掺量较少时,碱性离子与空气中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  发生反应生成晶体  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,填充在试样空隙中,提高试块的密实性和抗压强度<sup>[19-20]</sup>;粉土掺量较多时,改良风积沙碱性较强,较强碱性环境下碱性离子与水泥水化物反应产生胶结能力差的硅酸钠 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) 和铝酸钠 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )<sup>[19]</sup>;同时粉土比表面积大于风积沙,保水性更好,可以吸附大量水分。综上,适量粉土有利于水泥水化作用和沙粒与水泥水化产物联结,过量粉土,会阻碍水泥水化作用,同时产生胶结能力差的产物,不利于水泥水化物、粉土和沙粒之间的联结。宏观表现为  $q_t$  和内摩擦角随粉土掺量增加逐渐增大,增速在较大粉土掺量时,逐渐降低,黏聚力随粉土掺量的增加先增大后减小。

## 5 结 论

a. 不同种类风积沙应力-应变曲线均呈现应变软化的特点,且粉土掺量越多,应变软化现象越明显。

b. 掺入 5% 水泥后,风积沙的弹性模量、破坏强度、黏聚力和内摩擦角均提高;弹性模量随粉土掺量的增加呈现“峰形”变化,15% 粉土掺量的改良风积沙  $E$  最大; $q_t$  与粉土掺量正相关,增速随着粉土掺量的增加逐渐降低。

c. 风积沙  $c_{cu}$  和  $\varphi_{cu}$  均大于  $c'$  和  $\varphi'$ ,但随水泥和粉土掺入,变化趋势相同;随着 5% 水泥掺入黏聚力提高,内摩擦角相对提高较小;掺入粉土对黏聚力和内摩擦角影响显著,黏聚力随粉土掺量的增加先增大后减小,5% 水泥+10% 粉土时,黏聚力最大;内摩擦角随粉土掺量的增加持续增大,5% 水泥+20% 粉土掺量内摩擦角最大。改良风积沙  $\alpha$  在  $64.5^\circ \sim 68.5^\circ$  之间。

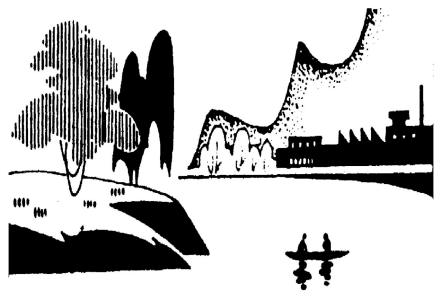
d. 水泥水化物 C-S-H 包裹在沙粒表面使沙粒表面变得粗糙,同时 C-S-H、CH、AFt 和 AFm 在沙粒之间的空隙相互贯穿形成网状结构,将沙粒联结起来;掺入少量粉土时,可以填充沙粒之间的空隙,较弱碱性环境下产生的  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,有利于提高材料强度,粉土掺量较多时,过量粉土可以吸附大量水分,阻碍水泥水化反应,碱性离子与水化物反应产生胶结能力差的 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) 和 ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ),导致水泥的联结作用降低,不利于材料性能的提高,改良风积沙的整体性能下降。

## 参考文献:

- [1] 金旻昊,崔强,周楠,等. 水泥固化作用对风积沙试样抗剪强度影响机制的试验研究[J]. 工业建筑,2019,49(7):108-112. (JIN Minhao, CUI Qiang, ZHOU Nan, et al. Experimental research on influence mechanism of cement solidification on shear strength of aeolian sand samples[J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 108-112. (in Chinese))
- [2] 张景焘. 风积沙的压实特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):77-82. (ZHANG Jingtao. Study on compaction characteristics of aeolian sand[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(1):77-82. (in Chinese))
- [3] 任辉明,曾新迪,师高鹏,等. 水泥改良风积沙无侧限抗压强度试验研究[J]. 兰州交通大学学报,2017,36(4):67-72. (REN Huiming, ZENG Xindi, SHI Gaopeng, et al. Experiment research on unconfined compressive strength of cement improved aeolian sand[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2017, 36(4): 67-72. (in Chinese))
- [4] 唐玉龙. 大何铁路路基水泥改良粉细砂填料的试验研究[J]. 铁道标准设计,2012(6):24-27. (TANG Yulong. Experimental study on cement-improved silty sand used in subgrade of data-hejata railway[J]. Railway Standard Design, 2012(6):24-27. (in Chinese))
- [5] 胡三喜. 包西铁路榆林地区风积沙填料物理改良研究[J]. 铁道标准设计,2012(7):18-22. (HU Sanxi. Research into physical improvement of aeolian sand as filling material in Yulin section of Baotou-Xi'an railway[J]. Railway Standard Design, 2012(7): 18-22. (in Chinese))

- [6] 屈泽刚,陈志华,秦伟,等. 风积沙路基填筑料的物理改良研究[J]. 铁道建筑技术,2010(3):138-140. (QU Zegang, CHEN Zhihua, QIN Wei, et al. On the physical improvement of aeolian sand roadbed [J]. Railway Construction Technology, 2010(3):138-140. (in Chinese))
- [7] 张达德,张家豪,简大为,等. 土工格室于砂土之承载能力及动态特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(12):1833-1837. (CHANG T, CHANG Chiahao, CHIEN Tawei, et al. Bearing capacity and dynamic properties of sandy soil with confinement of geocells [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12):1833-1837. (in Chinese))
- [8] 包建强,邢永明,刘霖. 土工格栅层式加筋风积沙的动力性状[J]. 工业建筑,2019,49(11):77-81. (BAO Jianqiang, XING Yongming, LIU Lin. Dynamic Characteristics of reinforced aeolian sands with geogrid [J]. Industrial Construction, 2019, 49(11):77-81. (in Chinese))
- [9] 景宏君,景宏伟,俞茂宏. 土工格室在加固沙漠高速公路路基中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006(6):15-18. (JING Hongjun, JING Hongwei, YU Maohong. Application of geocell to strengthen expressway subgrade in desert [J]. Journal of Changan University (Natural Science Edition), 2006(6):15-18. (in Chinese))
- [10] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3):335-353.
- [11] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3):258-268.
- [12] SANTONI R L, WEBSTER S L. Airfields and roads construction using fiber stabilization of sands[J]. Journal of Transportation Engineering-Asce, 2001, 127(2):96-104.
- [13] 李德超. 石灰粉煤灰稳定沙漠沙路用性能研究[J]. 中南公路工程,2005(3):92-96. (LI Dechao. Properties of lime and fly-ash stabilized aeolian sand for highway applications [J]. Central South Highway Engineering, 2005(3):92-96. (in Chinese))
- [14] 胡玉娇,尚淑萍,石红鸽,等. 石灰粉煤灰加纤维稳定风积沙路用性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(2):136-139. (HU Yujiao, SHANG Shuping, SHI Hongge, et al. Study on Road-used Performance for stabilizing Aeolian Sand by Adding Fiber into Lime Flyash [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(2):136-139. (in Chinese))
- [15] 张彩利,孟庆营,韩森. 聚丙烯纤维在风积沙基层材料中的应用研究[J]. 中外公路,2007(2):154-157. (ZHANG Caili, MENG Qingying, HAN Sen. Application of polypropylene fiber in aeolian sand base materials [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2007(2):154-157. (in Chinese))
- [16] CHAUHAN M S, MITTAL S, MOHANTY B. Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(5):429-435.
- [17] 李佳杰,田正宏,许健,等. 混掺粉土与水泥改良风积沙堤坝性能试验研究[J]. 水电能源科学,2021,39(8):112-115. (LI Jiajie, TIAN Zhenghong, XU Jian, et al. Experimental study on performance of aeolian sand dike improved by cement and silt [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(8):112-115. (in Chinese))
- [18] 赵昊宇,田正宏,许健,等. 水泥混掺粉土改性风积沙冻融特性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):107-113. (ZHAO Haoyu, TIAN Zhenghong, XU Jian, et al. Analysis on freeze-thaw properties of aeolian sands improved by cement-silt mixtures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2):107-113. (in Chinese))
- [19] 李晓明,臧德胜. 碱性环境对水泥材料的力学性能影响[J]. 长春工业大学学报,2015,36(4):456-460. (LI Xiaoming, ZANG Desheng. Effect of alkaline environment on the mechanical properties of cementitious materials [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2015, 36(4):456-460. (in Chinese))
- [20] 李洋,王述银,殷海波,等. 碱对水泥基材料水化及水化产物的影响研究综述[J]. 长江科学院院报,2019,36(1):127-133. (LI Yang, WANG Shuyin, YIN Haibo, et al. Review on the influence of alkali on hydration and hydration products of cement-based materials [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1):127-133. (in Chinese))

(收稿日期:2022-02-26 编辑:刘晓艳)



# 鄂西山区农村生活污水处理及排放状况调查研究

王煜<sup>1</sup>, 郑伟<sup>1</sup>, 卢晓春<sup>1</sup>, 李宁<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 宜昌市水利水电勘察设计院有限公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**以鄂西山区某饮用水源水库周边农村福善场村为例,通过现场调查分析和水质检测对鄂西山区农村生活污水处理及排放状况进行了调查研究。结果表明:鄂西山区农村生活污水主要通过集中微动力污水处理站、三户联排小型微动力污水处理设施和三格式化粪池3种方式处理后排入地表沟渠、堰塘或下渗至地下;经3种污水处理方式处理后的出水水质均未达到农村生活污水排放水质要求,对邻近饮用水源水库水质具有一定影响;农村微动力污水处理设施存在运行成本高、运维程序复杂、疏于管理、有效运行时间短等问题,致使其难以达到相应的污水处理效果;根据当地农村地势及生活污水排放特点研究新型农村生活污水处理方式是保障鄂西山区农村水环境安全与质量的当务之急。

**关键词:**农村生活污水;饮用水源水库;现场调查;水质检测;鄂西山区

**中图分类号:**X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0058-05

**Investigation on rural domestic sewage treatment and discharge conditions in montane of western Hubei//WANG Yu<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1</sup>, LU Xiaochun<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>** (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Yichang Water Conservancy and Hydropower Design Institute Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Taking the rural Fushanchang village around a drinking headwater reservoir in western Hubei montane as a research example, an investigation was carried out on the current situation of rural domestic sewage discharge and treatment in western Hubei montane through on-site investigation and water quality testing. The results show that rural wastewater in western Hubei montane is mainly treated by three methods, including centralized micro-powered station, small micro-powered facility for three-household combined discharge, and three-format fermenting tanks. After treatment, the sewage is discharged into surface ditches, weirs and ponds or infiltrated into the ground. The test results of the effluent water quality of the three wastewater treatment methods cannot meet the requirements of rural domestic wastewater discharge water quality, and it has a certain impact on the water quality of the adjacent water source reservoir. The micro-powered sewage treatment facilities have high operating costs, complex operation and maintenance procedures, negligent management and short effective operation time, making it difficult to achieve the appropriate sewage treatment effect. Therefore, the study of new rural domestic wastewater treatment methods based on the characteristics of rural terrain and domestic wastewater discharge in western Hubei montane is imperative to ensure the safety and quality of the rural water environment.

**Key words:** rural domestic sewage; drinking water reservoir; site investigation; water quality analysis; western Hubei montane

鄂西山区位于我国地形台阶第二级阶梯的东部边缘,区域内山脉总体呈 NE-SW 走向,平原、丘陵、山地所占比例分别为 10%、21% 和 69%,形成了“一平二丘七山”的独特地形结构<sup>[1]</sup>,构造了鄂西山区复杂的地形地貌<sup>[2]</sup>。

由于特殊的地理位置和气候条件,鄂西山区农村一直处于缓慢发展状态,村庄较为分散,基础设施

落后,经济条件差。自 2017 年以来,随着乡村振兴战略的提出与实施,农村的经济发展和生活水平有所提高<sup>[3-4]</sup>,随着经济的快速发展,鄂西山区农村生活污水的排放量和污染负荷呈不断上升趋势<sup>[5-6]</sup>,特别是邻近饮用水源水库的农村地区,农村生活污水通过地表径流、土壤渗透等方式进入水库,污染水库水体,给人们的饮水安全和身体健康造成巨大威胁<sup>[7-8]</sup>。

**基金项目:**湖北省水利重点科研项目(1321244)

**作者简介:**王煜(1976—),女,教授,博士,主要从事水电站生态运行及河流水生态环境研究。E-mail:wangyuhoney@163.com

**通信作者:**杨超(1982—)男,高级工程师,博士,主要从事水动力学研究。E-mail:yangchao@126.com

为详细了解农村生活污水排放情况和治理现状,合理制定农村生活污水的处理措施及方案,提升农村生活污水治理效果,本文对鄂西山区典型农村福善场村的生活污水处理和排放现状进行调查,根据水质检测结果分析现有生活污水处理设施的污水处理效率以及排放状况,明确影响鄂西典型农村水环境安全的关键因素和存在问题,以期为解决农村生活污水达标排放问题提供参考。

## 1 研究区概况

鄂西山区属山地丘陵地带,山区村落分布较为分散,村内农户以散居为主,房屋多依山而建。受地理及气候条件影响,鄂西山区内水系丰富且相互连通,村民日常的生活污水及农田面源污水通过地势落差汇入下游水体,未经处理或未达标排放的农村生活污水汇入水系,可能造成水生态环境发生严重恶化。位于鄂西地区中部的福善场村是一座典型的山区村落,村内地势高差大,农户房屋多依傍山体而建,该村行政区域面积约 7.5 km<sup>2</sup>,总耕地面积 71 hm<sup>2</sup>,山脚处紧邻一座饮用水源水库(图 1)。福善场村下辖 9 个村民小组,共有散居农户 323 户 1088 人,其中 33 户集中居住在村委会附近较为平坦的地带,其余农户均散居至距水库库岸 500 m 范围内,其中 136 户位于水库外围 100 m 范围内,该村农户生活污水主要为日常生活、盥洗、养殖排放污水,水体具有典型的农村生活污水特征。因此,以福善场村为例,探究村内的污水排放和治理情况,以及对于邻近水库水质的影响。

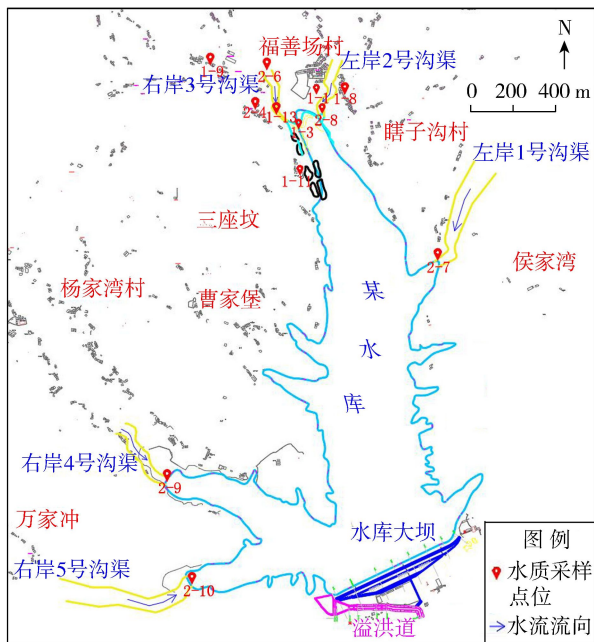


图 1 水库入流及水库周边农村位置分布

该水库隶属长江水系,是一座以城市供水为主,

灌溉为辅,兼顾防洪等综合利用的中型水库枢纽工程<sup>[9]</sup>,作为饮用水源水库,其流入、流出水质均应满足地表水Ⅱ、Ⅲ类水质要求。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》联合要求,当处理设施位于地表水Ⅱ、Ⅲ类功能的湖泊保护区外围 500 m 范围内,不区分规模和出水排放去向,水污染物排放应执行 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》中所要求的一级标准。

## 2 农村生活污水排放标准及水质检测方法

按照 DB 42/1537—2019《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》中一级标准对调查区域水样各项指标进行化验分析,每个采样点水样做两次平行检测并取其平均值。标准限制包括水污染物排放基本控制项目 pH 值、悬浮物(SS)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和选择控制项目总氮(TN)、总磷(TP)、动植物油。详细检测指标和检测方法见表 1。

表 1 水质检测指标和检测方法

检测指标	检测方法	仪器型号
溶解氧(DO)	溶氧仪检测	HQ 系列便携式测定仪
pH 值	玻璃电极法	UB-7 型 pH 计
浊度	浊度仪法	WGZ-200A 浊度仪
电导率	电导率仪法	DDSJ-308A 电导率仪
SS	重量法	AP-01P 抽滤机、ML104/02 天平
NH <sub>3</sub> -N	纳氏试剂分光光度法	UV2601 分光光度计
TP	钼酸铵分光光度法	UV2601 分光光度计、SX-700 总磷灭菌锅
COD <sub>Cr</sub>	快速消解分光光度法	UV2601 分光光度计、DRB-200 消解仪
粪大肠菌群	滤膜法	HS1300 洁净工作台、QXH-250BSH-Ⅲ 恒温箱

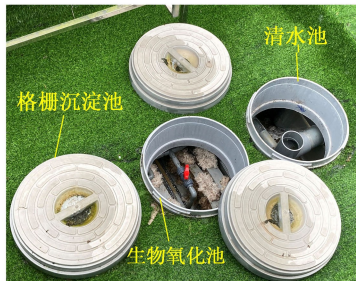
## 3 福善场村生活污水处理及排放状况

### 3.1 生活污水处理方式及效果

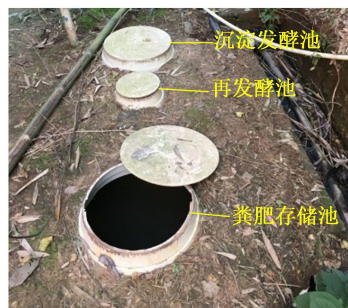
福善场村目前对农户生活污水采用 3 种处理方式:住房集中、地势平坦的 33 户采用集中式微动力污水处理站(图 2(a));邻水库分散住户(距离水库库岸 100 m 以内)采用三户联排小型微动力污水处理设施(图 2(b));其他分散住户采用单户三格式化粪池(图 2(c))。其中微动力污水处理设施利用 A/O 生物接触氧化法为处理工艺<sup>[10]</sup>,其工艺流程为格栅沉淀池→生物氧化池→清水池,污水经格栅沉淀池沉降固体颗粒杂质和拦截悬浮污物后利用水泵将池内上层澄清液提升至生物氧化池内,生物氧化池利用内部填充的多孔球型悬浮滤料截留悬浮固体杂质,同时利用滤料表面附着的微生物黏膜对污水



(a) 集中式微动力污水处理站



(b) 三户联排小型微动力污水处理设施



(c) 单户三格式化粪池

图2 福善场村现有农户生活污水处理措施

中的有机污染物做进一步吸附降解处理。三格式化粪池利用厌氧发酵、中层过粪和寄生虫卵沉淀的原理<sup>[11]</sup>,其工艺流程为沉淀发酵池→再发酵池→粪肥存储池,粪便在沉淀发酵池(第一池)内沉积发酵分解,初分解的上层肥料液体流入再发酵池内(第二池)继续发酵、分解使其进一步无害,该过程寄生虫卵继续下沉,最后再发酵池内上层肥料液体流入粪肥存储池(第三池),以达到沉淀或灭杀粪便中寄生虫卵、肠道致病菌的目的。

为分析3种污水处理方式的处理效果,分别针

对集中微动力污水处理站(图1的采样点1-1),三户联排小型微动力污水处理设施(图1的采样点1-8、1-11和2-4)和单户三格式化粪池(图1的采样点1-9)进行进、出水水质检测。结果得出:3种不同污水处理设施的出水水质指标均存在不同程度的超标现象(表2),集中式微动力处理站出水水质相对最优,除 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 略高于标准排放值外,其他均在标准限值内;三户联排小型微动力污水处理设施出水水质较差,出水DO浓度增大,浊度、电导率、粪大肠菌群数虽均有一定程度下降,但出水TP、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 均超标,两处采样点(1-11和2-4)出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标,甚至存在出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 指标高于进水指标的现象;单户三格式化粪池污水处理设施出水水质最差,出水中SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 等指标均超出标准限值2倍以上,分别为标准排放值的2.28倍、3.67倍、10.46倍和3.95倍。

现场调查得知上述污水处理设施净水效果不佳是因为设备运行费用及运维操作不当等问题导致。微动力污水处理设施内的耗电装置为提升水泵,提升水泵的作用是将格栅沉淀池内污水抽至生物氧化池并维持其正常工作水位,水泵的正常运行耗电量约为 $10\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{d}$ 。但运行期间因耗电费用问题致使提升水泵和液位电控装置常处关闭状态,水泵无法正常工作,仅依靠污水在格栅沉淀池顶部溢流进入生物氧化池。污水自流导致在污水排放高峰期格栅沉淀池和生物氧化池有污水满溢现象发生;污水排放低谷期又因格栅沉淀池的供水不及时导致生物氧化池出现干涸状态,由此造成生物氧化池内滤料表面生物膜常处于干湿交替的状态,严重影响膜上微生物活性及生物膜稳定性,进而影响微生物对于污水的深度降解处理。村内安装的化粪池是按照每户4人规格设置的深度为 $1.2\text{ m}$ 、总容积为 $4.0\text{ m}^3$ 的日字形三格化粪池,属无动力型污水处理设施,由于农村技术水平有限,化粪池在运行期间无专业吸污

表2 不同污水处理设施进、出水水质检测结果

污水处理设施	采样点	取水位置	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU}\cdot\text{L}^{-1})$	
集中式微动力	1-1	出水口		8.18	6.97	5.18	518	20.0	0.39	0.88	61.08 ↑	1320	
	1-8	进水口	21.2	4.97	7.63	7.66	878	25.0	25.30	3.84	71.52	454000	
三户联排小型微动力	1-11	出水口	23.2	7.98	6.22	0.73	394	12.5	0.88	2.00 ↑	146.00 ↑	40	
		进水口	22.7	3.70	7.71	16.34	949	15.5	28.62	5.02	113.98	3767	
	2-4	出水口	20.5	6.36	6.73	1.52	811	19.0	9.64 ↑	7.91 ↑	174.69 ↑	10	
		进水口	13.1	8.08	7.44	5.73	704	9.0	28.45	5.37	378.03	2650	
	三格式化粪池	1-9	出水口	13.9	10.52	7.10	1.58	634	9.5	44.50 ↑	5.76 ↑	142.66 ↑	—
			进水口	21.4	3.27	7.62	17.09	130	45.5 ↑	50.54 ↑	10.46 ↑	236.87 ↑	11650

注:“↑”表示该指标值超标。下同。



设备对沉淀发酵池底层粪渣进行定期清掏,农户也较为反对手动清理粪渣沉积物,即便清理,若不及时对粪渣做高温堆肥处理,污物散发的强烈刺激性气味也会对空气质量造成一定影响。不及时清掏粪渣使得沉淀发酵池底部粪污淤积过多、无法对粪尿进行充分沉淀,由此造成再发酵池的污染负荷及粪渣增加,再发酵池无法对粪液中寄生虫卵和微生物做充分的厌氧发酵消杀。且化粪池的沉淀发酵池内粪污杂质淤积过多还会堵塞过粪管,影响化粪池正常运行,甚至导致其无法运行<sup>[12-13]</sup>。

### 3.2 生活污水排放情况

农户日常生活污水主要经过3种污水处理设施处理后排入村内修建的沟渠,或直接排入田地,通过沟渠径流和土壤渗流直接或间接排入水库。

据调查,邻库(距离库岸50m以内)部分农户存在一定数量的家禽养殖,养殖污水未经处理直接排入水库,或者排入邻库堰塘,通过堰塘的溢流和土壤渗流间接排入水库,养殖污水的汇入可能对水库水质产生一定影响。针对福善场村邻库库尾右岸50m范围内的两户家禽养殖量较大的农户(1号农户养殖鸡约200只,2号农户养殖鸡、鸭共约280只)进行邻库堰塘水质检测,得出养殖农户住宅邻库堰塘水体SS和粪大肠菌群严重超标,其中1号农户房前堰塘和邻库堰塘水体的COD<sub>Cr</sub>和TP都严重超标,超标倍数分别是1.55倍和5.52倍(表3)。

由表3可见,若福善场村农户的生活污水处理效果不理想,可能通过地表径流或地下渗流等方式汇入水库,对水库水体水质产生一定程度的影响。因此,必须对农村生活污水的排放及排放水体水质进行有效的控制和处理,特别是对饮用水源水库周

边农村生活污水排放进行控制。

## 4 福善场村生活污水排放对水库水质的影响

汇入水库地表径流除上游补给水渠外,库周地表径流主要通过5条沟渠汇入水库,其中左岸2号和右岸3号沟渠为福善场村汇入水库的主要沟渠(图1),沟渠出口紧邻农户住宅集中区域,左岸1号沟渠、右岸4号沟渠、右岸5号沟渠虽分别经侯家湾、杨家湾、万家冲汇入水库,但沟渠出口离村民住宅集中区域较远,渠水主要以天然径流为主。为对比分析不同沟渠水体水质,进一步明确邻库农村生活污水排放对水库水质的影响,选取5条沟渠汇入水库的渠首以及位于福善场村的库边水体(图1的采样点1-3、1-13、2-6、2-7、2-8、2-9和2-10)水体进行水质检测,结果见表4。由表4可见,除左岸2号沟渠的浊度、SS及粪大肠菌群数严重超标外,其他水质指标均在排放标准以内,说明5条沟渠入库水体的水质整体情况尚好。左岸2号沟渠取水点为福善场村七组沟渠与该水库的交汇处(采样点2-8),该沟渠沿程除靠近福善场村委会附近的部分为浆砌石边墙外,其余很长一段均为土质边墙,渠深变浅,渠内水体主要由沿程农业面源污水和农户生活污水组成,此沟渠水质浊度、SS及粪大肠菌群数的超标,说明该沟渠沿程农户及农田的排放污水水质欠佳。沟渠的入库水体水质略好于岸边浅水区(采样点2-7、2-9和2-10)。对比5条主要沟渠入库水体的水质,邻近福善场村村委会的库尾岸边(采样点1-3)及库尾生态林(采样点1-13)的水体水质情况略差,这两个位置都出现了COD<sub>Cr</sub>超标现象,说明库岸浅水区水体受邻近农户生活污水排放和农田面源污水的情

表3 库边农户邻库堰塘水质检测结果

堰塘位置	温度/℃	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU} \cdot \text{L}^{-1})$
1号农户房前	14.8	9.72	7.04	47.88	235	10.0	0.61	0.39	93.12 ↑	7433
1号农户邻库	12.8	7.10	6.96	超出范围	168	266.5 ↑	3.92	5.52 ↑	30.39	411000 ↑
2号农户邻库	13.3	6.23	7.09	10.25	196	62.5 ↑	0.37	0.36	34.86	10650 ↑

表4 库岸主要沟渠入库水质

采样位置	采样点	温度/℃	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH值	浊度/NTU	电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\rho(\text{SS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	粪大肠菌群数/ $(\text{CFU} \cdot \text{L}^{-1})$
左岸1号沟渠	2-7	13.3	10.69	7.72	12.64	234	5.5	0.24	0.16	26.37	100
左岸2号沟渠	2-8	11.9	11.20	7.86	577.45	244	47.5 ↑	0.44	0.25	21.31	14600
右岸3号沟渠	2-6	11.0	12.20	7.41	17.43	236	17.0	0.27	0.23	34.27	100
右岸4号沟渠	2-9	13.3	10.74	7.88	9.49	235	12.5	0.25	0.12	27.41	
右岸5号沟渠	2-10	13.7	10.49	7.87	9.69	233	6.5	0.23	0.15	20.41	1000
库尾福善场村库岸水体	1-3	19.0	9.97	7.91	15.14	262	14.0	0.15	0.07	73.44 ↑	
库尾生态林临岸水体	1-13	22.6	9.76	8.27	12.14	263	24.5 ↑	0.40	0.06	94.99 ↑	20

况较为严重。由此可见,邻库农村生活污水的排放直接影响水库水质,经处理但未达标的污水无论是通过地表径流还是地下渗透等方式汇入水库,都将导致水库水体受到污染,进而对人们的生活和健康带来不利影响。因此,研究和实施高效的农村生活污水处理措施,提高库周农村生活污水净化效率是当前保障饮用水源水库水质的关键。

## 5 结 语

目前鄂西农村生活污水处理方式主要有集中微动力污水处理站、三户联排小型微动力污水处理设施、单户三格式化粪池3种方式,经3种污水处理方式处理后的污水均未能达到农村生活污水排放要求,其中污水处理效果最优的为集中微动力污水处理站,最差的为单户三格式化粪池。农村生活污水主要通过污水管网排入沟渠或散排进入土壤的方式排放,水体经沟渠地表径流或土壤地下渗流的方式汇入邻村水库水体,农村生活污水处理效果对水库水质产生较大程度的影响。农户家禽养殖产生的生活污水未采取有效处理措施,污水经雨水或堰塘排入水库,对水库水质产生影响。饮用水源水库库周离岸越近的农村,其生活污水排放对水库水体水质影响越大。

根据饮用水源水库邻库福善场村生活污水处理及排放状况调查结果,可见目前鄂西典型农村采用的生活污水处理方式均未能达到理想的处理效果,虽然集中微动力处理站具有最优的处理效果,但出水 $COD_{Cr}$ 指标仍存在超标现象,而三户联排小型微动力污水处理设施和单户三格式化粪池则出现TP、 $COD_{Cr}$ 、 $NH_3-N$ 指标均超标的现象,可见这两种污水处理设施对鄂西农村生活污水的治理具有一定的局限性。通过村委会和农户入户调查,得出三户联排小型微动力污水处理设施运行电费问题未得到妥善解决,设备间断运行导致生物氧化池在二级处理阶段未发挥其氧化分解有机污染物的作用、三格式化粪池又因粪污清掏等问题造成污染负荷增加及过粪管堵塞现象发生。由此可见,对于农户住宅分散、经济技术落后、紧邻重要水库或河系水体的鄂西农村,急需采用运维简单、费用低廉、低能耗、净水效率高的生活污水处理设施以提升鄂西农村生活污水处理效果,满足污水排放要求。

## 参考文献:

[1] 罗菊英,周建山,刘健,等.鄂西南不同地形地貌环境下大雾气候特征分析[J].高原山地气象研究,2011,31(4):51-58. (LUO Juying, ZHOU Jianshan, LIU Jian, et

al. Analysis of the heavy mist characteristics in different geographical conditions in the southwest of Hubei Province [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2011, 31(4):51-58. (in Chinese))

[2] 苏新洲,殷志山,施顺英,等.鄂西地区地形变和地壳稳定性研究[J].地壳形变与地震,1995,15(3):96-100. (SU Xinzhou, YIN Zhishan, SHI Shunying, et al. Study on crustal deformation and crust stability in western Hubei [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1995, 15(3):96-100. (in Chinese))

[3] 高磊.新时代的生态循环大变革[J].城乡建设,2018(13):40-43. (GAO Lei. Great change of ecological cycle in new era [J]. Urban and Rural Development, 2018(13):40-43. (in Chinese))

[4] 王丛雅,胡梦娇,黄世业,等.温州市农村生活污水处理现状与问题[J].给水排水,2019,55(增刊1):181-184. (WANG Congya, HU Mengjiao, HUANG Shiye, et al. Present situation and problems of rural domestic sewage treatment in Wenzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(Sup1):181-184. (in Chinese))

[5] 范彬,穆丹丹,朱仕坤.关于我国乡村分散污水处理排放标准的思考[J].科学技术与工程,2016,16(22):118-125. (FAN Bin, MU Dandan, ZHU Shikun. Reflection on rural decentralized sewage treatment emission standards [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22):118-125. (in Chinese))

[6] 谢林花,吴德礼,张亚雷.中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J].生态与农村环境学报,2018,34(10):865-870. (XIE Linhua, WU Deli, ZHANG Yalei. Analysis and evaluation of China's rural domestic sewage treatment technology [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(10):865-870. (in Chinese))

[7] 夏兴.我国农村生活污水处理技术的研究进展[J].中国资源综合利用,2019,37(9):84-86. (XIA Xing. Research progress of rural domestic sewage treatment technology in China [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(9):84-86. (in Chinese))

[8] 李菊,胡颖铭,彭子宸,等.四川省农村地区生活污水处理现状调研分析[J].四川环境,2020,39(5):164-169. (LI Ju, HU Yingming, PENG Zichen, et al. Investigation and research of the current situation of rural domestic sewage treatment in Sichuan province [J]. Sichuan Environment, 2020, 39(5):164-169. (in Chinese))

[9] 熊进,田婧.善溪冲水库引水渠虾子包旱渡槽膨胀土改良试验研究[J].水利科技与经济,2018,24(4):76-80. (XIONG Jin, TIAN Jing. Experimental study on improvement of expansive soil in Xiazhibao dry aqueduct of diversion canal of Shanxichong reservoir [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2018, 24(4):76-80. (in Chinese))

(下转第88页)

# 基于高密度电法和综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法

沈添耀,董海洲

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

**摘要:**为准确探测堤坝渗漏通道的位置及范围,降低单一探测方法的局限性及不确定性,提出了一种基于高密度电法与综合示踪法的堤坝渗漏通道联合探测方法。抽水蓄能电站实例验证表明:综合示踪法通过多种示踪试验对高密度电法测试成果进行验证,可以有效辅助高密度电法判别低阻异常区,解决高密度电法成果解释非唯一性问题;高密度电法和综合示踪法联合进行堤坝渗漏通道探测效率高,准确性强。

**关键词:**高密度电法;综合示踪法;渗漏通道;抽水蓄能电站

**中图分类号:**TV698.1;P624

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2023)02-0063-07

**Combined detection method of dam leakage channels based on high-density electrical method and comprehensive tracer method//**SHEN Tianyao, DONG Haizhou (College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to accurately detect the location and range of dam leakage channels and reduce the influence of the limitation and uncertainty of single method on the detection result, a method of combining high-density electrical method and comprehensive tracer method to detect the hidden dangers of dam leakage is proposed. The verification of a pumped storage power station example shows that, the results of the high-density electrical method can be verified by the comprehensive tracer method through several tracing tests. The dam leakage channel detection technology combined with high-density electrical method and comprehensive tracer method accurately reveals the location and range of the hidden danger of dam leakage, overcomes the non-unique defect of single method detection result. The combination of high-density electrical method and comprehensive tracer method for dam leakage channel detection has high efficiency and accuracy.

**Key words:** high-density electrical method; comprehensive tracer method; leakage channel; pumped storage power station

堤坝的隐患具有隐蔽性、时空随机性等特征,隐患的存在会减少堤坝的使用寿命,甚至造成溃坝的发生<sup>[1]</sup>。我国许多堤坝存在渗漏安全隐患,渗透破坏形成渗漏通道是产生安全隐患的重要原因之一<sup>[2]</sup>。如果未能及时发现并采取有效措施对渗漏问题进行处理,就会对堤坝的使用寿命和安全性造成一定的威胁<sup>[3-4]</sup>。因此,准确查明堤坝内部的渗漏通道,为堤坝防渗处理提供指导尤为重要,有利于提高工程的经济效益和社会效益<sup>[5]</sup>。

目前的堤坝渗漏探测方法一般有地质钻探技术<sup>[6]</sup>、地球物理勘探技术<sup>[7-8]</sup>(以下简称“物探”)以及综合示踪技术<sup>[9]</sup>等。地质钻探技术只能探测出钻孔周围的地质条件,堤坝整体探测需要的钻孔数

量多,对堤坝破坏性较大,成本高,经济效益较低。物探广泛应用于水文、地质等领域,该方法探测堤坝隐患的原理是利用隐患处与周围岩体之间的物理性质(如密度、磁性、电学性质等)差异来寻找地质异常区域,不破坏堤坝结构,不影响使用性能,可以确定地层中的构造、裂缝、空洞等可能的导水通道,但较难确定这些通道内地下水的流动性、上下游的水力联系,不能确定这些通道是否造成了渗漏。综合示踪法是通过各种天然和人工示踪剂对堤坝内部地下水的来源进行辨别,将各种示踪剂得到的结果综合分析,描绘堤坝内部的渗流场,建立多点之间的水力联系,同时定量计算出地下水流速、渗流量等参数,但是根据这种方法得到的渗漏通道位置、走向等

**基金项目:**国家重点研发计划(2019YFC1510802)

**作者简介:**沈添耀(1998—),男,硕士研究生,主要从事堤坝渗透破坏探测研究。E-mail:1198318151@qq.com

**通信作者:**董海洲(1976—),男,副教授,博士,主要从事渗透破坏和环境岩土工程研究。E-mail:donghzh@hhu.edu.cn

是通过分析而来,其结果仅仅是一种推断。

由于单一方法的局限性以及不确定性等问题,近年来,国内外学者开始应用多种方法结合对堤坝渗漏进行探测,将多种方法得到的结果相互印证,提高探测渗漏通道位置的准确性。有学者采用多种物探方法对堤坝渗漏进行探测,如 Martinez-Moreno 等<sup>[10-12]</sup>将电阻率法与其他物探方法(磁法、弹性波法等)联合对堤坝渗漏进行探测,结果表明综合物探方法能够较准确地揭示渗漏隐患位置与范围。除了应用综合物探方法进行探测以外,还有学者将物探方法与其他方法结合探测堤坝隐患,如 Lee 等<sup>[13-15]</sup>将多种物探方法与钻探、染料示踪等方法联合对堤坝渗漏进行探测。

目前,高密度电法和综合示踪法为应用较广的探测方法,但将两者结合进行堤坝渗漏调查尚不多见。高密度电法<sup>[16-17]</sup>是堤坝渗漏探测的重要且应用较多的方法。相对于传统电法而言,高密度电法具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点<sup>[18]</sup>。高密度电法同时具备电剖面法和电测深法 2 种方法的综合探测能力,能够探测出地下沿长度-深度方向的二维空间电场分布情况,进而判断出可能存在的渗漏通道位置。现在发展起来的三维高密度电法<sup>[19]</sup>更是能够探测出沿长度-宽度-深度方向的三维空间电场分布情况,能够更为直观地揭露堤坝内部渗漏通道的存在,降低了探测结果非唯一性的影响。但高密度电法作为物探方法在进行地下水渗漏探测时具有一定的局限性,而综合示踪法可以在高密度电法探测的基础上进行补充和验证。综合示踪法将同位素示踪与盐类示踪、染色示踪等结合,通过温度、电导、环境同位素等天然示踪剂,荧光剂、食盐溶液等人工示踪剂,对堤坝内部渗漏隐患进行探测,定性判断各点水力联系,定量计算地下水流速,解决高密度电法探测结果解释非唯一性问题。

本文提出了一种高密度电法与综合示踪法联合探测堤坝渗漏隐患的方法(以下简称高密度电法-综合示踪法联合探测方法),实现 2 种方法优势互补,进而更大程度上提升探测的准确性,克服单一方法探测的不确定性,并通过某抽水蓄能电站右岸的渗漏探测的实例应用,对高密度电法与综合示踪法联合探测堤坝渗漏隐患的可行性进行了验证。

## 1 探测原理

### 1.1 高密度电法

在应用于堤坝渗漏探测的多种物探参数中,土体电阻率最敏感,因此多采用电法对堤坝渗漏隐患进行探测<sup>[17]</sup>。其中高密度电法<sup>[20]</sup>应用最为广泛,准

确性较高。高密度电阻率法属于直流电阻率法,它是在常规电法勘探基础上发展起来的一种阵列勘探方法,是以岩土体的电性差异为基础,研究在施加电场的作用下,地下传导电流的变化分布规律。当堤坝内部存在渗漏隐患时,隐患处孔隙率与含水率增大,使得该处与周围岩土体相比,会出现低阻异常现象。

高密度电法探测系统包括数据采集部分和数据处理部分,如图 1 所示。现场测量时,只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,并与电极转换器及高密度主机连接。高密度电法仪的核心是电测仪和电极转换器,电极转换器是一种由单片机控制的电极自动换接装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式及测点的转换,同时将测量信号送入电测仪。测量完成后,将测量数据导入计算机进行数据处理,最终通过正反演软件成像并对资料进行解释。

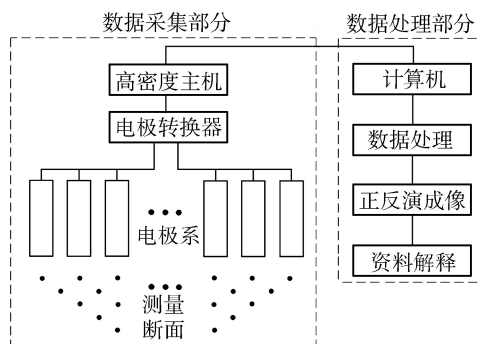


图 1 高密度电法探测系统

### 1.2 综合示踪法

综合示踪法<sup>[21-22]</sup>是通过各种天然、人工示踪剂,测定水文地质参数、地下水渗透流速等,寻找渗漏源。综合示踪法对地下水渗流进行定性和定量的研究,探测水库或堤坝的渗漏情况,可以获得:①堤坝下游地下水的来源。堤坝下游的地下水来源不一定全是库水,可能是邻近含水层中的水、含水层中的水与库水的混合或者山坡水等。因此,在调查渗漏时,首先要做的就是判断渗流水的来源;②下游出水点的水力学特征。当库水某些成分发生变化时,通过出水点处水的成分是否随之发生变化,判断两点或多点之间的水力联系;③人工示踪剂浓度随时间的变化情况,进而定量计算库水与出水点之间水的流动速度。

综合示踪法分为天然示踪法<sup>[23]</sup>和人工示踪法<sup>[24]</sup>,天然示踪剂包括温度、电导、环境同位素(如  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ )、水化学离子(如  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ ),人工示踪剂包括荧光素、放射性同位素(如氡、 $^{131}I$ )、食盐溶液等。除了上述常规示踪剂外,其他通过不同方式进入水中的物质也可以作为示踪剂,如:①城市工业废水,这些废水根据来源不同经常含有一些特定的化学元素,可以通过这些化学元素建立库水与渗流水之间的水力

联系;②水中的微量元素,例如地震活动或者残余的火山活动会使水中微量元素硼的含量增多,在这些地区的水库可以通过硼作为示踪剂来探测渗漏。

## 2 高密度电法-综合示踪法联合探测方法

高密度电法-综合示踪法联合探测方法探测堤坝渗漏隐患的思路:①通过高密电法探测发生渗漏处的岩层电阻率分布情况,确定电阻率异常区域;②在电阻率异常位置布置钻孔,为后续示踪试验做准备;③对库水、山坡水、渗漏位置水、钻孔水等进行天然示踪试验;④在钻孔内投入人工示踪剂,计算钻孔内水的流速,同时在库水、山坡水等位置投放人工示踪剂进行连通试验;⑤联合分析高密度电法和综合示踪法探测成果,综合判断渗漏通道位置以及范围。

高密度电法-综合示踪法联合探测渗漏通道施工工艺流程如图2所示。联合探测具体实施步骤主要包括高密度电法探测、钻孔布置、综合示踪探测及渗漏通道综合判定等。

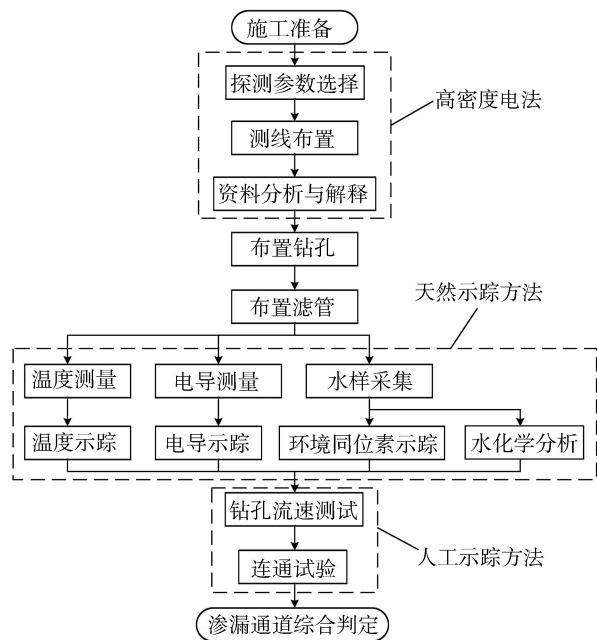


图2 高密度电法-综合示踪法联合探测渗漏通道施工工艺流程

### 2.1 高密度电法探测

高密度电法探测步骤包括探测参数选择、测线布置和资料分析与解释。①探测参数选择:包括电极极距、电极个数、排列方式等。根据堤坝长度选择合适的电极间距以及电极个数,以保证对堤坝内部电阻率的整体探测。根据多种排列方式对坝区的初步探测结果,对比坝区实际地质条件,选择合适的排列方式并确定电极布设安排。②测线布置:按照电极布设安排布置电极,保证电极与土体接触良好,并通过电缆连接电极。③资料分析与解释:根据测试要求采集数据,并将数据导入计算机,进行数据预处理,

最终通过正反演软件反演成像,根据成像结果,分析电阻率异常区域,初步确定可能存在的导水通道。

### 2.2 钻孔布置

根据高密度电法探测结果,选定合适位置布设钻孔。采用工程钻机进行钻孔,钻孔口径及钻具规格保证成孔后钻孔符合规范要求。各钻孔水位以下所有测试段采用透水滤管,滤管采用PVC管或钢管。滤管均匀呈梅花形开孔,上下两排孔交错布置。地下水水位以上的套管部分不开孔,保持原状不透水。套管高出地面20cm左右,防止地面上的杂物掉入钻孔内。

### 2.3 综合示踪法探测

综合示踪法探测步骤包括温度、电导示踪、采集水样、环境同位素、水化学示踪、钻孔流速测试和连通试验。①温度、电导示踪:探测库水、山坡水等可能的渗漏来源的温度、电导,同时绘制钻孔水的温度-深度、电导-深度图,分析钻孔水来源。②采集水样:采集库水、山坡水、钻孔水、渗漏处水的水样。③环境同位素、水化学示踪:对水样进行环境同位素、水化学分析,研究各点之间水组成成分的相似性。④钻孔流速测试:在钻孔内投入示踪剂,通过示踪剂浓度变化计算钻孔内水的水平、垂向流速。⑤连通试验:在库水、山坡水等位置投放人工示踪剂,监测钻孔、渗漏处是否出现示踪剂,验证各点之间的连通性。

### 2.4 渗漏通道位置及范围综合判定

以高密度电法探测的岩层电阻率分布情况为基础,在电阻异常区域钻孔,通过综合示踪法对电阻异常区域进行判别,依据大量的物探、同位素、温度电导、地下水流速、水化学等试验数据,对渗水点地下水来源、途径等进行综合判断,多种方法和技术可以相互验证和校正,得到更为准确的结论,实现2种方法联合对堤坝渗漏隐患进行探测,为后续防渗加固处理提供技术支撑。

## 3 实例验证

### 3.1 工程概况

将本文提出的联合探测方法应用于山东省某抽水蓄能电站(图3),电站上水库挡水坝采用钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程413.80m,坝顶长540.46m,最大坝高99.80m,坝顶宽10.00m。左岸布置有放空洞(兼导流、泄洪),右岸横岭山体布置有排水观测洞和上水库进/出水口,库盆防渗采用钢筋混凝土面板与库底高密度聚乙烯土工膜及垂直防渗帷幕相结合的综合防渗方案。2017年电站上水库右岸排水廊道渗流量突然增大,进出水口两侧渗压计测值出现大幅度增大的现象,严重影响电站的正常工作,造成安全隐患。

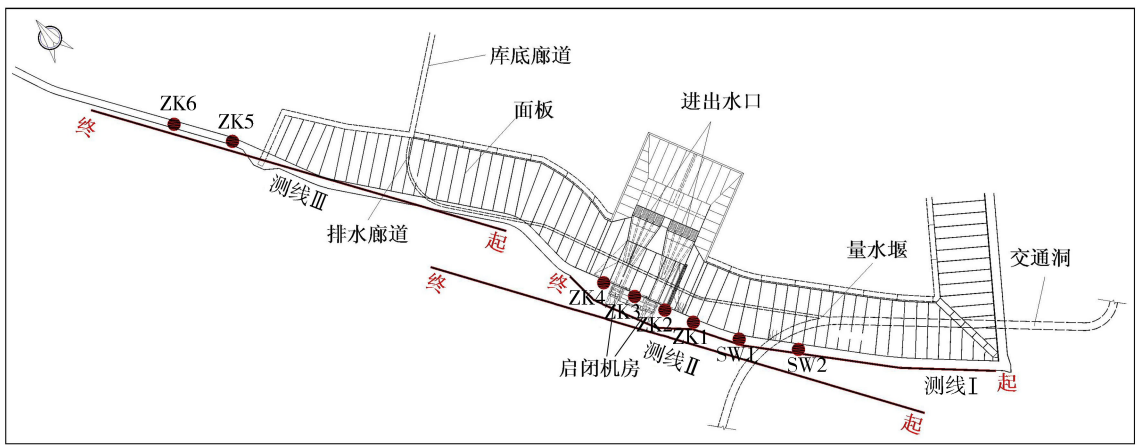


图3 测线以及钻孔布置

### 3.2 高密度电法探测

在电站上水库右岸沿岸共布置了3条测线(图3), 每条测线有110个电极, 电极极距为5 m, 长550 m。每条测线都是由南至北布设, 对应图3从右向左。测线I在进出水口位置弯曲, 但由于测线较长且弯曲弧度较小, 因此对结果的影响可忽略不计。采用温纳排列对3条测线进行探测分析, 将探测得到的结果进行坏点剔除、地形校正、格式转换、反演计算成图等步骤, 最终得到3条测线的电阻率图(图4~6)。当堤坝内部存在渗漏通道时, 渗漏位置处有地下水经过, 使得电导率增加, 电阻率降低, 在反演图中显示为低电阻异常。因此, 高密度电法探测可以通过识别反演图中低电阻区域, 判断出可能存在的渗漏通道位置, 如图4~6反演图中圈定位置即为断面低阻区域。

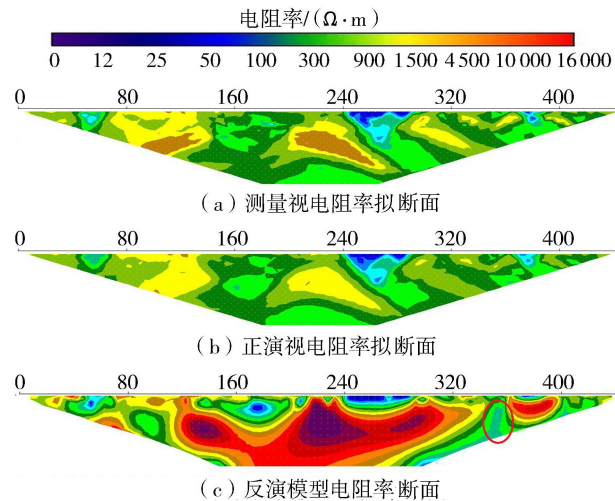


图4 测线I高密度电法断面

由图4可知, 测线I断面电阻率数据范围较大, 且存在多处表层低阻区域, 原因是测线经过公路花坛, 花坛填土材料或结构不均匀, 因此无需对该区域进行验证, 值得注意的是在长度方向350 m下方存在一个低阻区域。

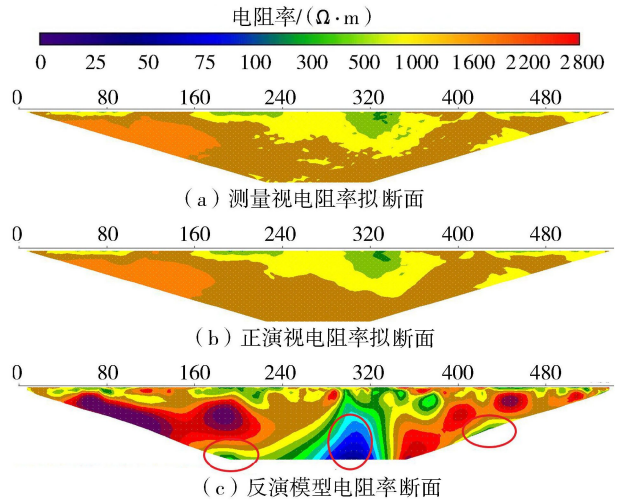


图5 测线II高密度电法断面

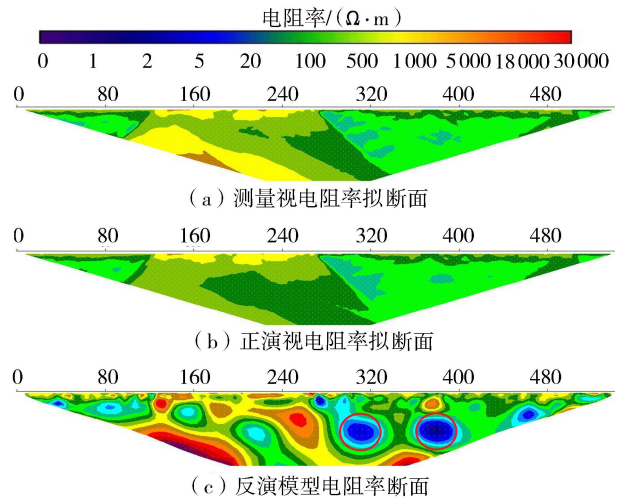


图6 测线III高密度电法断面

由图5可知, 测线II断面长度方向300 m下方有一处明显的低阻区域, 该区域为进出水口位置; 长度方向190 m、420 m下方有两处低阻区域, 结合前期渗压计观测数据, 两处均存在渗压异常现象, 因此也可能存在渗漏风险。

由图6可知, 测线III断面以长度方向280 m附近库底廊道入口为分界, 呈现左高右低的趋势, 与右

岸面板布置对应。库底廊道入口以南有面板防渗,电阻较高,测线左侧存在低阻区域,但深度较浅,无须验证,右侧未布置面板,电阻较低,而长度方向300 m 和 370 m 处存在两处明显的低阻区域。

在上述可能存在渗漏通道的6处低电阻区域布置钻孔,钻孔位置如表1所示。上水库右岸原有观测孔SW1和SW2位于ZK1南侧,钻孔布置点如图3所示,在上述钻孔内进行综合示踪法试验。

表1 钻孔位置

编号	位置
ZK1	启闭机房南侧公路
ZK2	启闭机房南侧
ZK3	进出水口中间
ZK4	启闭机房北侧
ZK5	库底廊道入口北侧 30 m
ZK6	库底廊道入口北侧 100 m

### 3.3 综合示踪法探测

#### 3.3.1 天然示踪法探测

在8个钻孔内采用温度电导仪以及多参数仪对钻孔温度和电导进行探测,得到温度-深度曲线和电导-深度曲线(图7、图8),将两条曲线联合分析。

— ZK1 — ZK2 — ZK3 — ZK4 — ZK5 — ZK6 — SW1 — SW2

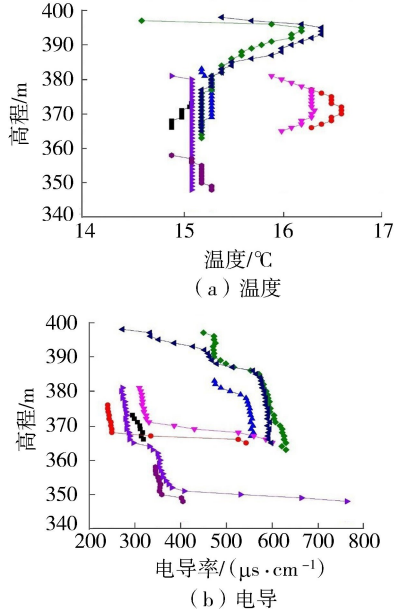


图7 各孔温度和电导随深度变化曲线

表2 温度和电导分析

编号	温度分析	电导分析	综合分析
ZK1	整孔温度较低	整孔电导较低	主要受边坡渗水影响,但附近有低温库水渗流
ZK2	高程370 m 以上升高,以下降低	高程368 m 以上较低,以下急剧升高	高程370 m 以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK3	整孔温度较低	整孔电导较高,高程378 m 处突变	主要受库水渗漏影响,高程378 m 处面板可能渗漏
ZK4	高程370 m 以上升高,以下降低	高程370 m 以上较低,以下急剧升高	高程370 m 以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK5	高程395 m 以上升高,以下降低	整孔电导较高,387 m 处突变	高程390 m 以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
ZK6	高程395 m 以上升高,以下降低	上部电导较低,后急剧升高	高程395 m 以上边坡渗水影响,以下库水渗漏影响
SW1	整孔温度较低	上部电导较低,高程364 m 处突变,底部急剧升高	垂向流使得整孔温度均匀,高程364 m 处可能受裂隙渗流影响
SW2	整孔温度较低	整孔电导较低	受边坡渗水影响,但附近有低温库水渗流

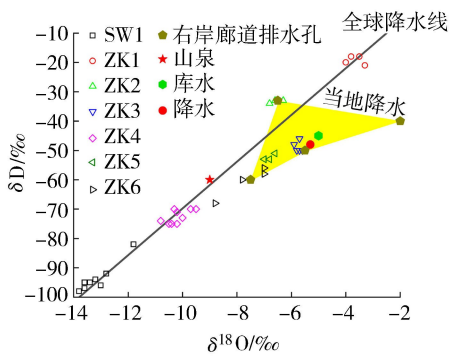


图8 钻孔水氢氧同位素组成分布特征

渗漏水一般有两个来源,分别为库水和边坡渗水,可以通过库水与边坡渗水的温度、电导差异,对比各钻孔内的温度、电导变化,推导各钻孔内水的来源。

钻孔温度探测在冬季进行,当时库水温度低于边坡渗水温度。经过探测,库水电导率平均值为768 μs/cm,边坡水电导率范围为200 ~ 300 μs/cm,库水电导率高于边坡水电导率。而右岸排水廊道渗漏水为库水与边坡渗水的结合,且库水所占比例较大。根据这2个特点可以对各钻孔地下水来源进行分析判断,各孔温度和电导综合分析见表2。

在钻孔、水库、排水廊道等位置采集水样,进行环境同位素以及水化学示踪,得到的结果如图8和图9所示。由图8可知,库水与右岸排水廊道渗漏水的氢氧同位素组成极为接近,渗漏水主要是库水。ZK3的氢氧同位素组成分布在两者附近,说明ZK3处主要受库水影响,渗漏通道经过ZK3处。而其余钻孔的氢氧同位素分布距离这3点都较远。图9的水化学Piper三线图可以揭示各点2009—2020年的水化学离子浓度变化。其中,廊道水、施工支洞水以及量水堰水水体在三线图上所在位置与库水集中分布,水化学类型相似,表明了这些水体的水化学形成存在一定的联系。

#### 3.3.2 人工示踪法探测

在ZK1 ~ ZK6中通过示踪剂进行钻孔流速测试,所用示踪剂为饱和食盐溶液,仪器为温度电导仪和多参数仪,通过孔内水的电导率变化,对孔中地下水水平流速进行计算,得到各孔水平流速如图10所示。

- 巴山沟水库(2009—2020年)
- 1号施工支洞(2009—2020年)
- 上水库(2009—2020年)
- × 5号施工支洞(2009—2020年)
- ▲ 库底郎道量水堰(2009—2020年)
- 下水库1996年
- 坝后量水堰(2009—2020年)
- 右岸平洞1996年
- ▽ 右岸排水廊道(2009—2020年)
- ◁ 樱桃园沟1996年
- + 下水库(2009—2020年)
- ▶ 左岸平洞1996年
- ◆ B2高乐支管廊道(2009—2020年)

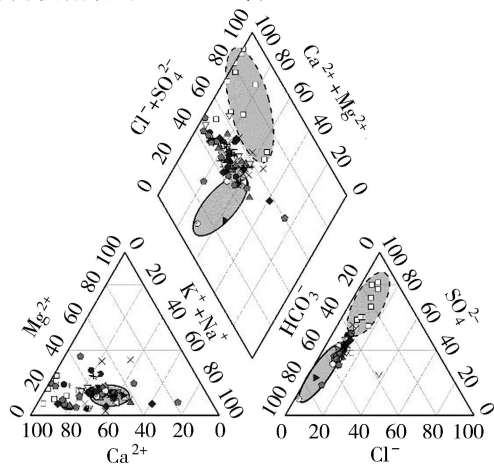


图9 水化学 Piper 三线图

由图 10 可知,ZK1 流速较低,小于 $0.01 \text{ m/d}$ ,主要受边坡渗水影响;ZK2 靠近启闭机房和 ZK3,流速较大,且流速较大的部位对应电导率示踪分析所确定的深部库水渗漏;ZK3 整孔流速较大,且在  $377 \sim 372 \text{ m}$  处存在流速相对较大的区域,对应库水渗漏;ZK4 靠近启闭机房和 ZK3,在  $373 \text{ m}$ 、 $369 \text{ m}$  处以及  $365 \text{ m}$  处流速相对较大,对应库水渗漏;ZK5 受库水影响但整孔流速较低,但局部裂隙或节理处流速变大;ZK6 上部流速较大,原因为边坡水水位升高,渗漏量增加,下部受库水渗漏影响,流速较小,但比 ZK5 高,渗透性更强,也存在局部裂隙或节理处流速相对变大的现象。

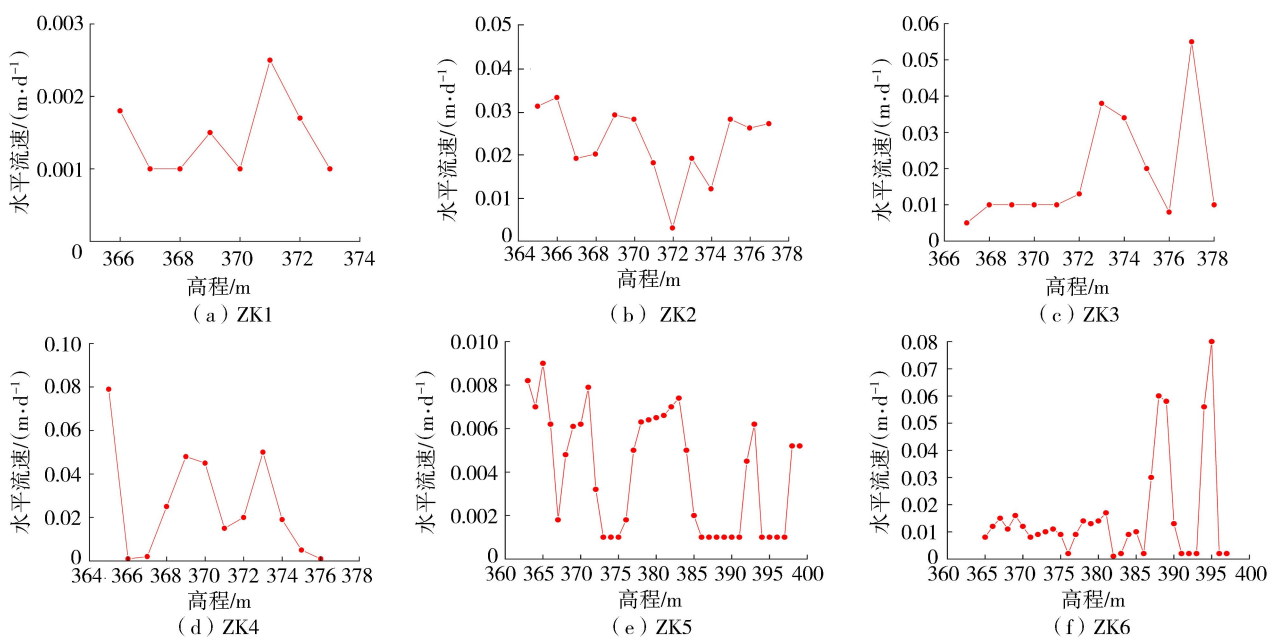


图10 各钻孔水平流速

### 3.4 联合探测结论

经过高密度电法和综合示踪法联合探测,最终得出结论:①水体天然同位素监测右岸廊道为库水渗漏补给为主,库底廊道排水孔水受区域地下水补给影响较大,受库水影响较小。钻孔水受渗漏库水和地下水双重补给影响。②ZK3 孔冬季天然状态下的高电导率和流速特征反映出目前库水的主要渗流在启闭机房对应高程  $378 \text{ m}$  以下,同时 ZK3 孔流速相对较大,判断进出水口侧壁存在渗漏通道可能性较大。启闭机房两侧 ZK2 和 ZK4 都受到库水渗漏的影响,流速较大,对应的渗漏较强。③ZK1 主要受边坡渗水影响,而 ZK5 和 ZK6 由于处于没有面板防渗的库尾,孔中受库水渗流的影响,表现为高电导和低温,但这 2 个孔的流速较小,右岸排水廊道渗水来自库尾绕流的可能性较小。后续对结论所得渗漏区域进行防渗处理,处理结果显示,排水廊道渗流量显著减小。由此可验证该联合探测方法准确揭示了渗漏的位置和范围,为后续防渗处理提供了指导性意见。

### 3.5 联合探测优势与改进措施

高密度电法探测结果显示右岸存在 6 处可能的渗漏通道,如只采用高密度电法探测,则需要对这 6 处区域都进行加固处理,处理成本较高。如只采用综合示踪法探测,则需要右岸每隔一定距离钻孔,在每个钻孔内进行示踪试验探测,钻孔多成本高,对堤坝破坏性较大,且数据量庞大,费时费力。而本文采用的高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术结合 2 种方法优势,在高密度电法探测结果基础上进行综合示踪法探测,在上述 6 处隐患位置钻孔进行示踪试验,最终发现仅有 1 处存在渗流通



道。由此可见,联合探测方法所需钻孔数量少,且减少了单一方法探测结果多解性,相较于单一方法,探测结果更准确,具有显著的经济效益。

在联合探测过程中,还可通过一些措施来提高探测准确性,如高密度电法大极距探测异常区可能不明显,可通过减小极距,布设多条测线,数据拼接提高精度,或在大极距探测基础上对重点区域进行小极距加密探测,进一步确定异常区域;如综合示踪法中温度为辅助物理量,可添加热源法理论,通过温度独立分析渗漏位置与范围。

## 4 结 语

高密度电法具有抗干扰能力强、观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点,但成果解释存在非唯一性的问题,而综合示踪法通过多种示踪试验对高密度电法成果进行验证,可以有效辅助高密度电法判别低阻异常区,解决高密度电法成果解释非唯一性问题。实例验证结果显示基于高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术极为准确地揭示了渗漏的位置与范围,效率高,准确性强。在实际工程中,为达到更高的准确性,可对本文提出的高密度电法-综合示踪法联合的堤坝渗漏探测技术进行改进,在高密度电法探测中减小电极极距、布置多条测线进行数据拼接,对重点区域小极距加密探测;在综合示踪法探测中添加热源法理论等。

相较于单一方法探测结果,多种方法综合测试能够起到相互补充、相互验证的效果,保证了探测的准确性。因此,在可行的条件下,采用多种方法对堤坝渗漏进行探测,避免某些因素对结果产生干扰,影响结果的准确性,有重大的静、动态经济效益和社会效益。

## 参考文献:

[ 1 ] ZHONG Q, WANG L, CHEN S, et al. Breaches of embankment and landslide dams; state of the art review [ J ]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103597.

[ 2 ] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 土石坝渗透破坏溃决机理及数值模拟 [ J ]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42 ( 6 ): 697-703. ( CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, CAO Wei. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams [ J ]. *Scientia Sinica ( Technologica )*, 2012, 42 ( 6 ): 697-703. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 岑威钧, 陈司宁, 李邓军, 等. 考虑土工膜缺陷的石渣坝三维渗流特性分析 [ J ]. *河海大学学报 ( 自然科学版 )*, 2021, 49 ( 5 ): 413-418. ( CEN Weijun, CHEN Sining, LI Dengjun, et al. Characteristic analysis of 3d seepage field of a geomembrane faced rockfill dam considering defects of geomembrane [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2021, 49 ( 5 ): 413-418. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 宋锦焘, 袁帅, 段梦强, 等. 基于麻雀搜索算法和滞后效

应的土石坝渗流监控模型 [ J ]. *水利水电科技进展*, 2022, 42 ( 5 ): 52-57. ( SONG Jintao, YUAN Shuai, DUAN Mengqiang, et al. Seepage pressure monitoring model for earth-rockfill dams based on sparrow search algorithm and hysteresis effect [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42 ( 5 ): 52-57. ( in Chinese ) )

[ 5 ] 苏怀智, 周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展 [ J ]. *水利水电科技进展*, 2022, 42 ( 1 ): 1-10. ( SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42 ( 1 ): 1-10. ( in Chinese ) )

[ 6 ] WU Y, XU S, LI Q, et al. Estimation of real fracture parameters of a dam concrete with large size aggregates through wedge splitting tests of drilled cylindrical specimens [ J ]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016, 163: 23-36.

[ 7 ] 白广明, 张守杰, 卢建旗, 等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析 [ J ]. *河海大学学报 ( 自然科学版 )*, 2018, 46 ( 1 ): 52-58. ( BAI Guangming, ZHANG Shoujie, LU Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2018, 46 ( 1 ): 52-58. ( in Chinese ) )

[ 8 ] HOHLFELD T, DOERRER T, SERFLING U, et al. Der einsatz von innovativen geophysikalischen methoden bei der erkundung von hochwasser-rueckhaltebecken und talsperren-fallbeispiele aus der praxis [ J ]. *Wasserwirtschaft*, 2013, 103 ( 5 ): 136-139.

[ 9 ] MOZAFARI M, RAEISI E, ZARE M. Water leakage paths in the doosti dam, Turkmenistan and Iran [ J ]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65 ( 1 ): 103-117.

[ 10 ] MARTINEZ-MORENO F J, DELGADO-RAMOS F, GALINDO-ZALDIVAR J, et al. Identification of leakage and potential areas for internal erosion combining ert and ip techniques at the negratin dam left abutment ( Granada, southern Spain ) [ J ]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 74-80.

[ 11 ] 李宏恩, 徐海峰, 李铮, 等. 地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究 [ J ]. *地球物理学进展*, 2019, 34 ( 4 ): 1627-1634. ( LI Hongen, XU Haifeng, LI Zheng, et al. In situ experimental study on resistivity-magnetic resonance sounding coupling imaging diagnosis method for an embankment dam with seepage defects [ J ]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34 ( 4 ): 1627-1634. ( in Chinese ) )

[ 12 ] GOLEBIEWSKI T, PIWAKOWSKI B, CWIKLIK M, et al. Application of combined geophysical methods for the examination of a water dam subsoil [ J ]. *Water ( Basel )*, 2021, 13 ( 21 ): 2981.

[ 13 ] LEE J, CHOI Y, KIM H, et al. Hydrologic characteristics of a large rockfill dam; implications for water leakage [ J ]. *Engineering Geology*, 2005, 80 ( 1/2 ): 43-59.

( 下转第 75 页 )

# 多含水层渗流系统电导示踪模型

柴 栋<sup>1</sup>,方广涛<sup>1</sup>,邱春雄<sup>1</sup>,董海洲<sup>2</sup>,张利民<sup>1</sup>,张博宇<sup>1</sup>

(1. 中交隧道工程局有限公司,北京 100102; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

**摘要:**在利用钻孔测定含水层水文地质参数时,如遇到多含水层情况,需使用栓塞系统对各含水层进行隔离探测,由于现场操作较为不便且钻孔条件要求高,故提出多含水层渗流系统电导示踪模型。在不使用栓塞系统的情况下,考虑含水层涌水或吸水等不同情况,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,建立多含水层渗流系统电导示踪模型确定含水层渗透性参数。当钻孔中只存在涌水层时,直接利用电导率曲线面积与溶质质量的比例关系求解出流量;当钻孔中同时出现涌水层和吸水层时,根据溶质质量曲线的斜率可较准确地确定吸水层的位置,再由斜率的变化计算出含水层的流量。基于某工程实例采取3种方法求解各含水层的渗透系数、静水头、渗流速度、导水系数等水文地质参数,结果表明,采用电导示踪模型计算结果与同位素示踪测试及注水试验测试结果吻合较好,且电导示踪模型方法现场操作更为简便,可极大地提高含水层水文地质参数的测定效率。

**关键词:**电导示踪模型;渗流;多含水层;垂向流;电导率示踪

中图分类号:TV221.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0070-06

**Electric conductivity tracer model of a multi-aquifer seepage system**//CHAI Dong<sup>1</sup>, FANG Guangtao<sup>1</sup>, QIU Chunxiong<sup>1</sup>, DONG Haizhou<sup>2</sup>, ZHANG Limin<sup>1</sup>, ZHANG Boyu<sup>1</sup>(1. *CCCC Tunnel Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** In hydrogeological survey, the situation of multiple aquifers is often encountered in borehole testing, and it is necessary to use packer system to isolate and detect each aquifer. Due to the inconvenience for field operation and high drilling conditions required, a multi-aquifer seepage tracing model without packer system was proposed. Considering different conditions of aquifer inflow and out flow without using plugging system, an electric conductivity tracer model for a multi-aquifer seepage system was established to determine the permeability parameters by measuring the conductivity of each aquifer during pumping. When only the outflow aquifer exists, the flow rate can be calculated directly by using the proportion relation between the area of conductivity curve and solute mass. When both outflow layer and inflow layer appear in borehole, the position of inflow layer can be found accurately according to the slope of electrical conductivity curve, and then the flow rate of aquifers can be calculated by the change of slope. In a field test, the hydrogeological parameters such as permeability coefficient, hydrostatic head, seepage velocity and water conductivity coefficient of each aquifer were calculated by using three methods. The results show that the detection results obtained by the conductivity tracing model is in good agreement with the isotope tracer test and water injection test, and the proposed model is simpler to operate, which can greatly improve the detection efficiency of aquifer hydrogeological parameters.

**Key words:** electric conductivity tracer model; seepage; multi-aquifer; vertical flow; conductivity tracing

地下水渗流是影响水利工程建设、地下空间开发安全性的重要因素之一<sup>[1]</sup>,地下水渗流调查是制定有针对性防渗处理措施的前提和基础<sup>[2-3]</sup>。为了解地层的水文地质情况,通常需要获取渗流区域的空间分布(位置和范围)和渗透性参数。在多含水层系统中,确定各含水层位置及其水力特性尤为重

要<sup>[4]</sup>。钻孔勘探是常用的地下水渗流调查手段,已发展了多种方法以获取渗流信息<sup>[5-6]</sup>。岩芯分析和物探方法<sup>[7]</sup>可以对含水层进行定位,但难以确定含水层水力特性。钻孔栓塞抽水测试方法可以测定含水层渗透性,但由于需要使用栓塞进行阻水,现场操作较为复杂。许多工程实践表明<sup>[8-9]</sup>,钻孔示踪方法

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1510802)

作者简介:柴栋(1985—),男,工程师,主要从事城市轨道交通工程、地下工程研究。E-mail:1486021579@qq.com

通信作者:董海洲(1976—),男,副研究员,博士,主要从事地下水渗流研究。E-mail:dongzhz@hhu.edu.cn

是一种可以准确地对多含水层进行定位并确定其渗透性参数的测试方法,其中通过探测孔内地下水电导率参数来进行多裂隙系统渗流示踪研究已得到较多应用,但在不使用栓塞的情况下针对多含水层系统进行渗透性参数的研究尚不多见。

本文基于电导率示踪方法,建立多含水层渗流系统电导示踪模型,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,对比天然流场与人工流场,以求解各含水层的渗透系数、静水头、渗流速度及导水系数等水文地质参数,并通过工程实例验证该示踪模型的有效性。

## 1 多含水层渗流系统电导示踪方法

当钻孔揭露多个含水层时,由于各含水层的补给源和渗流路径不同,各含水层的静水头也往往不同。根据混合井流理论<sup>[10-11]</sup>,静水头高于混合水位的含水层均会发生涌水,而静水头低于混合水位的含水层则表现为吸水,涌水和吸水现象示意图见图1。

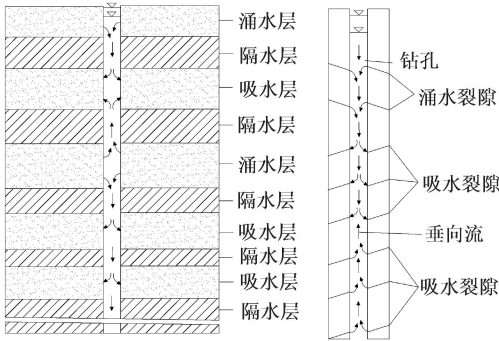


图1 多含水层渗流系统中的涌水和吸水现象示意图

电导示踪法是一种可以高效、经济地获得钻孔所揭露含水层水力特性的方法<sup>[12-13]</sup>,而且现场探测操作较为方便。该方法有两种实施方式:若地层中水的电导率较高,可将钻孔中的水置换为低电导率的水,此时含水层中的水可视为地下水渗流的示踪剂;反之,若地层中水的电导率较低,则可在钻孔中投放高电导率的盐水作为示踪剂,然后测量钻孔中水的电导率,以获得电导率随时间的变化曲线。本文以地层中水的电导率较高为例进行多含水层电导率示踪模型的研究,现场示踪测试的一般步骤如下:

①将低电导率的水以恒定的速率沿下方开口的管道投放至钻孔底部,并在短时间内以相同速率从钻孔顶部抽水,这样钻孔水就与地层中水的电导率有着明显的区别,若钻孔初始电导率较小或者在钻孔不久后进行电导率测井,也可不进行钻孔水的置换。②以恒定的低流量从钻井顶部抽水,同时将电导率探头放置到钻孔中,监测钻孔电导率,以获得示踪剂质量浓度与深度的关系曲线。当地层水进入钻孔涌水点位置,电导率曲线显示为峰值,这些峰值随时间的增长

沿垂向移动;③通过分析获取的测井资料,可计算各个含水层中地下水流入速度和示踪剂质量浓度。

## 2 孔中存在不同含水层时的流量计算模型

### 2.1 孔中无吸水层时的流量计算模型

假定在1个钻孔中存在2个涌水层(图2),图中 $q_1$ 、 $q_2$ 分别为第1、第2含水层单位时间内的流量, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别为第1、第2含水层水的示踪剂质量浓度,则 $q_1\rho_1$ 、 $q_2\rho_2$ 分别为第1、第2含水层的溶质质量流入速率。设这两个含水层流量均不相同,且其流量之和等于钻孔顶部的抽水流量 $Q$ 。

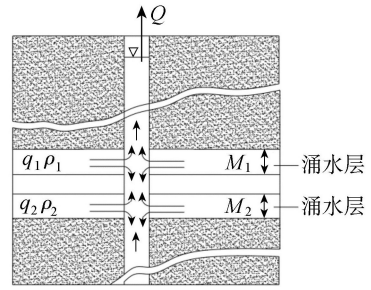


图2 涌水层示意图

各含水层示踪剂质量浓度呈单峰状分布,且峰值较高的曲线对应于较晚的时间。假设钻孔横截面直径远小于井深,则每个钻孔横截面处水的示踪剂质量浓度及化学成分是一致的;如果钻孔中不存在向上的垂向流且忽略密度效应,则每个涌水点的质量浓度曲线都是对称的。当以给定流量在井顶部抽水时,由于钻孔中水的向上流动,电导率曲线会存在倾斜,并且越靠近井顶部电导率曲线的倾斜越明显。

每个涌水层处电导率曲线积分面积与 $q_i\rho_i$ 是成比例的,具体关系如下:

$$\int_{x_i-\delta_1}^{x_i+\delta_2} \pi r_w^2 (\rho_i - \rho_0) dx = \alpha q_i \rho_i t \quad (1)$$

式中: $i$ 为含水层序号; $x_i$ 为示踪剂质量浓度峰值对应坐标; $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 分别为示踪剂质量浓度曲线与质量浓度背景值线在示踪剂质量浓度峰值两侧的交点的 $x$ 方向坐标; $r_w$ 为钻孔半径; $\rho_i$ 为第 $i$ 含水层 $x$ 位置处 $t$ 时刻的示踪剂质量浓度; $\rho_0$ 为示踪剂质量浓度背景值; $\alpha$ 为电导率与示踪剂质量浓度的关系常数(以Nap1溶液为示踪剂时常取1870); $t$ 为含水层水进入钻孔的时间。

式(1)假定含水层 $q_i$ 和 $\rho_i$ 都是恒定的,由于经过一段时间以后电导率曲线上各峰值会相互干扰,因此,式(1)左边数据只能通过早期的电导率曲线获得,故式(1)只能使用早期电导率数据进行计算。理论上,只要得到每个峰值的 $t$ 和 $q_i\rho_i$ 数据,每个涌水层的流量就能够计算出来。当测得两个不同时刻 $t_1$ 和 $t_2$ 的电导率曲线时,式(1)可改写为

$$\alpha q_i \rho_i = \frac{\int_{x-\delta_1}^{x+\delta_2} \pi r_w^2 (\rho_2 - \rho_1) dx}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

为简便起见,对 $\rho_i$ 的取值进行简化,直接取 $t_2$ 时的电导率所对应的示踪剂质量浓度,则可以直接计算出每个涌水层的 $q_i$ 。

## 2.2 涌水吸水混合时的流量计算模型

当钻孔同时揭露涌水层与吸水层,且呈天然状态或钻孔顶部抽水流量很低时,高水头含水层中的地下水会进入到钻孔中,并经由钻孔流向低水头的含水层,该过程即为垂向流动,如图3所示。

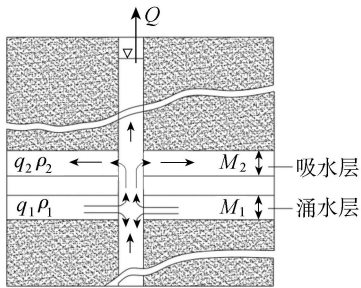


图3 吸水和涌水层系统示意图

理论上,在示踪剂质量浓度曲线上涌水层的位置会出现浓度峰值,吸水层的位置会出现浓度低谷,但是由于钻孔之间的内部流动补给量较小,实际吸水层的位置往往不会出现示踪剂质量浓度低谷,这就给求解吸水层的水力特性造成了一些困难。Doughty 等<sup>[14-18]</sup>模拟出吸水层和涌水层相邻的情况,假设吸水层流量为涌水层流量的2倍,此时吸水层处示踪剂质量浓度曲线有一些微小的变化,模拟时间越长,示踪剂质量浓度曲线在该处的斜率就越大。但是,这些微小变化还不足以确定出吸水层的位置及水力特性,本文假设含水层吸水量、涌水量及示踪剂质量浓度不随时间变化,提出一种基于离子质量守恒的方法来求吸水层的水力特性:①根据所测得示踪剂质量浓度曲线,通过积分方法计算出每条曲线与背景值所围面积 $A(t)$ , $A(t)$ 即为 $\delta_1 \sim \delta_2$ 范围内钻孔内示踪剂质量浓度之和(假定钻孔横截面上示踪剂均匀分布)。②将 $A(t)$ 乘以钻孔的横截面积得到 $t$ 时刻的溶质质量 $M(t)$ , $M(t)$ 是与 $t$ 有关的函数。需要注意的是,当溶质扩散到吸水层之前, $M(t)$ 是线性的,其斜率为

$$k_1 = q_1 (\rho_1 - \rho_0) \quad (3)$$

式中 $k_1$ 为溶质到达吸水层之前的 $M(t)$ 的斜率。

当溶质扩散到吸水层时,由于溶质离开钻孔并进入吸水层, $k_1$ 减小,当剩余溶质全部穿过吸水层并沿钻孔向上扩散,此时 $M(t)$ 的斜率呈线性变化,其斜率为

$$k_2 = q_1 (\rho_1 - \rho_0) - q_2 (\rho_1 - \rho_0) \quad (4)$$

式中 $k_2$ 为溶质穿过吸水层之后的 $M(t)$ 的斜率。

为简化计算,取 $\rho_1$ 为进入到吸水层中的溶质质量浓度,可得到吸水层的流量:

$$q_2 = \frac{k_1 - k_2}{\rho_1 - \rho_0} \quad (5)$$

通过比较 $M(t)$ 的斜率,能够比较容易地确定出吸水层的位置(斜率变化的位置)。

## 3 含水层导水系数的确定

假设井中水的流动满足达西定律<sup>[19]</sup>且这种流动是径向的,通过裘布依公式<sup>[20]</sup>可以得到:

$$q_i = \frac{2\pi T_i^* (S_i - S_0)}{\ln(R/r_w)} = T_i (S_i - S_0) \quad (6)$$

式中: $T_i^*$ 、 $T_i$ 分别为含水层导水系数和等效导水系数; $S_i$ 为各含水层的静水头; $S_0$ 为钻孔混合水位; $R$ 为径向距离; $R$ 为影响半径。

式(6)描述了垂直抽水井水平流动区的情况。如果不存在密度效应,式(6)也适用于非水平流动情况,此时 $R$ 可理解为流动区平面上的测量距离。由于钻孔内的导水系数通常远大于任何流入区的导水系数,因此 $S_0$ 在所研究的钻孔深度区间内是恒定的,故 $\sum q_i = Q$ ,则式(6)可改写成:

$$Q = \sum T_i (S_i - S_0) \quad (7)$$

如果将抽水流量从 $Q$ 改为 $Q'$ ,此时 $T_i$ 和 $S_i$ 保持不变,但 $S_0$ 变为 $S_0'$ , $q_i$ 变为 $q_i'$ ,再将得到的公式与原公式(7)比较,于是有

$$\Delta q_i = T_i (S_0 - S_0') \quad (8)$$

$$\Delta Q = T_{\text{tot}} (S_0 - S_0') \quad (9)$$

其中  $\Delta q_i = q_i - q_i'$   $\Delta Q = Q - Q'$   $T_{\text{tot}} = \sum T_i$

由式(8)和式(9)可以得到:

$$\frac{\Delta q_i}{\Delta Q} = \frac{T_i}{T_{\text{tot}}} \quad (10)$$

式(10)即为含水层渗流流量变化与钻孔顶部抽水流量变化的基本关系式。当 $Q$ 改变时,具有较大导水系数的渗流点或渗流区域表现出更大的强度变化。如果当第 $i$ 含水层的导水系数比其他含水层大很多时, $T_i \approx T_{\text{tot}}$ , $\Delta q_i \approx \Delta Q$ ,当抽水流量改变时,其他含水层的流量不会有太大改变。式(10)也可以用来比较第 $i$ 含水层与特定的含水层 $j$ ,即:

$$\frac{T_i}{T_j} = \frac{\Delta q_i}{\Delta q_j} \quad (11)$$

此外,根据式(6)和式(8)可以得到:

$$\frac{q_i}{\Delta q_i} = \frac{S_i - S_0}{S_0 - S_0'} \quad (12)$$

因此  $\frac{S_i - S_0}{S_j - S_0} = \frac{q_i / \Delta q_i}{q_j / \Delta q_j}$  (13)

如果事先使用压水试验或者其他勘测方法知道了某一含水层  $j$  的导水系数  $T_j$  和该层的静水头  $S_j$ , 就可以通过两个不同的抽水流量条件下得到的  $q_i$  和  $\Delta q_i$ , 再根据式(11)和式(13)计算出任一含水层的导水系数  $T_i$  和静水头  $S_i$ 。这种方法不需要对每一含水层进行点稀释法测井。需要注意的是, 式(11)和式(13)每次只考虑两个含水层, 计算结果的精确性独立于其他含水层以及总的抽水流量  $Q$  和总导水系数  $T_{\text{tot}}$ 。

式(10)有几种特殊情况, 如果当所有含水层的  $T_i$  值相同时, 有:

$$\Delta q_i = \frac{\Delta Q}{N} \quad (14)$$

式中  $N$  为含水层个数。当  $Q$  改变时, 所有含水层流量改变相同。

另一方面, 如果所有含水层的水头相同, 可以得到:

$$\frac{q_i}{Q} = \frac{T_i}{T_{\text{tot}}} = \frac{\Delta q_i}{\Delta Q} \quad (15)$$

需要注意的是, 当所有含水层的水头相同, 所有含水层的性质需要一致, 含水层都是吸水或者都是涌水。在这种情况下, 如果改变  $Q$ , 每个含水层的  $\Delta q_i/q_i$  均相同, 并且有:

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = \frac{\Delta Q}{Q} \quad (16)$$

最后, 如果每个含水层的导水系数和水头都相同, 通过式(6)可以得知所有含水层的流量都相同, 于是有  $q_i = Q/N$ , 式(14)和式(16)等价。

根据上述分析, 在两种抽水流量下得到的电导率曲线是合理的, 如果现场测试只进行了一种抽水流量试验, 可通过比较天然流场与抽水条件下的涌(吸)水量变化与钻孔顶部流量变化之间的关系, 进而求解出任意含水层的导水系数等水文地质参数。

本文基于电导率示踪方法, 通过测定各含水层的电导率得到各含水层流量计算公式, 进而建立多含水层渗流示踪模型, 该模型也可应用于钻孔注水条件, 此时可将注水等价于抽水(即将注水试验视为流量为负值的抽水试验), 然后重复上述步骤, 通

过比较天然流场与注水条件下的涌(吸)水量的变化与钻孔顶部流量变化之间的关系, 进而求解出任意含水层的导水系数等水文地质参数。

## 4 工程实例

某研究区岩层走向 NNE, 倾向 NWW, 倾角  $5^\circ \sim 10^\circ$ , 总体呈单斜构造, 其中 22 号勘察孔孔深 463.10 m, 揭露有石炭系太原组和三叠系山西组、下石盒子组和部分上石盒子组地层, 岩性为砂层、灰岩、泥岩和煤层互层沉积, 因而形成多层承压含水层。从区域水文地质条件分析, 地下水主要接受当地含水层出露区降水入渗补给, 在河流切割地段可接受河床渗漏补给。受区域排泄基准控制, 地下水总的流向为从西向东。

通过同位素示踪和电导示踪分别对人工流场和天然流场下的孔内垂向流速和流向进行探测。其中, 人工流场采用注水方法, 注水高度 17.10 m, 稳定注水量  $6.23 \text{ m}^3/\text{h}$ 。根据两种流场状态下的垂向流速的测定成果, 参照前期地质勘查结果, 在测试段内划分了 7 个含水层, 同时计算出每个含水层的渗透系数、静止水位和单位涌水量等参数, 如表 1 所示(其中垂向流方向都为垂直向下, 且表中仅列出含水层数据, 隔水层未列出)。

取示踪试验所得天然流场各含水层涌水量(吸水量)作为  $q_i$ , 取注水试验所得人工流场各含水层涌水量(吸水量)作为  $q'_i$ 。由于天然流场和人工流场是两种不同情况, 故有两个不同的  $Q$ 。利用式(7)或式(8)计算各含水层的导水系数, 所有含水层的总导水系数  $T_{\text{tot}}$  可通过注水试验获得, 特定含水层导水系数  $T_j$  可通过抽水试验获得。

采用式(8)来计算各层导水系数, 可以利用电导示踪直接获得各含水层的涌水量(吸水量), 选用最浅含水层作为特定含水层  $j$ , 计算得到 1~7 含水层导水系数分别为  $3.87 \text{ m/h}$ 、 $3.90 \text{ m/h}$ 、 $1.23 \text{ m/h}$ 、 $0.61 \text{ m/h}$ 、 $0.11 \text{ m/h}$ 、 $0.07 \text{ m/h}$  和  $0.04 \text{ m/h}$ , 总导水系数为  $9.83 \text{ m/h}$ 。表 2 列出了按 3 种计算方法得出的有关参数, 可以看出 3 种方法所得参数结果相近, 说明

表 1 22 号孔多含水层渗透系数等参数计算结果

含水层岩性	层厚/m	孔径/mm	垂向流速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )		垂向流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )		涌吸水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )		渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	导水系数/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )
			天然流场	人工流场	天然流场	人工流场	天然流场	人工流场		
中砂岩	18.77	127	7.5	306.0	0.095	3.877	0.095	-2.356	20.622	3.871
粗砂岩	19.35	110	12.0	150.0	0.114	1.426	0.019	-2.451	20.659	3.998
中砂岩	7.00	110	10.0	66.0	0.095	0.628	-0.019	-0.798	17.921	1.254
细砂岩	10.06	110	6.0	21.6	0.057	0.206	-0.038	0.422	5.717	0.575
灰岩	5.97	110	4.5	12.6	0.043	0.120	-0.014	-0.086	1.646	0.098
灰岩	3.45	110	4.2	6.0	0.027	0.057	-0.016	-0.063	1.919	0.066
灰岩	2.93	90	0.9	1.9	0.006	0.012	-0.021	-0.045	1.226	0.036

式(8)计算方法可靠。

表2 不同方法含水层参数计算结果对比

方法	注(吸)水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	导水系数/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )
同位素测试	6.233	0.149	10.13
注水试验	6.233	0.146	9.86
本文模型	6.233	0.145	9.83

## 5 结 语

a. 基于电导率示踪方法,通过测定抽水条件下各含水层的电导率,针对不同情况构建多含水层渗流示踪模型。当孔中只存在涌水层时,直接利用电导率曲线面积与溶质质量的比例关系求解出流量;当钻孔中同时出现涌水层和吸水层时,根据溶质质量曲线的斜率可较准确地找出吸水层的位置,再由斜率的变化计算出吸水层的流量。

b. 推导出天然流场与抽水条件下含水层涌(吸)水量的变化与钻孔顶部抽水流量变化之间的关系,并推广到天然流场与注水条件中(将注水试验视为抽水流量为负值的抽水试验),可求解出任意含水层的渗透系数、导水系数等水文地质参数。将本文模型应用于工程实例,求解出的参数值与同位素测试及注水试验所得的参数值相比误差较小,验证了该模型的有效性。

## 参考文献:

[1] 高明鹏,郑西来,郑天元,等. 截渗墙作用下滨海地下水渗流与排泄特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(4):111-119. (GAO Mingpeng, ZHENG Xilai, ZHENG Tianyuan, et al. Seepage and discharge characteristics of coastal groundwater under the action of the cutoff wall[J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Sciences), 2022, 52(4): 111-119. (in Chinese))

[2] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):1-10. (in Chinese))

[3] ZHONG Q, WANG L, CHEN S, et al. Breaches of embankment and landslide dams-state of the art review [J]. Earth-science Reviews,2021,216:103597.

[4] 赵宝峰,吕玉广. 基于底板砂岩含水层放水试验的多含水层水力联系研究[J]. 煤矿安全,2020,51(12):34-39. (ZHAO Baofeng, LYU Yuguang. Study on hydraulic connection of multiple aquifers based on dewatering test of sandstone aquifer from floor[J]. Safety in Coal Mines, 2020,51(12):34-39. (in Chinese))

[5] 王刚,王烁,赵建粮,等. 地下水监测井钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):51-56. (WANG Gang, WANG Shuo, ZHAO Jianliang, et al. Groundwater monitoring wells drilling technology [J]. Drilling Engineering,2019,46(9):51-56. (in Chinese))

[6] BEDMAR A P, ARAGUAS L. Detection and the prevention of leaks from dams [M]. Lisse: Taylor & Francis,2002.

[7] HOHLFELD T, DOERRER T, SERFLING U, et al. Der einsatz von innovativen geophysikalischen methoden bei der erkundung von hochwasserrueckhaltebecken und talsperren:fallbeispiele aus der praxis [R]. Wiesbaden: Springer-Fachmedien Wiesbaden for Viewegu,2013:103, 136-139.

[8] 万继伟,陈艳国,崔超,等. 引汉济渭工程黄三隧洞地下水渗流同位素综合示踪探测分析研究[J]. 水利水电技术,2017,48(8):111-119. (WAN Jiwei, CHEN Yanguo, CUI Chao, et al. Analysis on comprehensive isotopic-tracing detection of underground water seepage in Huangsan Tunnel of Hanjiang River to Weihe River Valley Water Diversion Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(8): 111-119. (in Chinese))

[9] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.

[10] 陈建生,杜国平,郑正,等. 多含水层稳定流非干扰多孔混合井流理论及示踪测井方法[J]. 水利学报,1997,28(5):61-66. (CHEN Jiansheng, DU Guoping, ZHENG Zheng, et al. Multi-aquifer stable flow non-interference porous mixed well flow theory and tracer logging method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(5): 61-66. (in Chinese))

[11] 陈建生,杜国平,郑正,等. 坝基渗流场探测中多含水层稳定流混合井流理论与综合示踪法[J]. 江苏农业学报,1997,13(1):32. (CHEN Jiansheng, DU Guoping, ZHENG Zheng, et al. Multi-layers stable flow blending well theory and a synthetical trace method for detecting leaks of abutement and dam base [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 1997, 13(1): 32. (in Chinese))

[12] 陈建生,杨松,樊哲超. 孔中测定多含水层渗透流速方法研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):327-330. (CHEN Jiansheng, YANG Songtang, FAN Zhechao. Researches on measuring seepage velocity in the borehole of multi-aquifer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 327-330. (in Chinese))

[13] 王新建,陈建生,陈亮. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):67-71. (WANG Xinjian, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam [J]. Advances in Science and

- Technology of Water Resources, 2005, 25(6): 67-71. (in Chinese))
- [14] DOUGHTY C, TSANG C F, HATANAKA K, et al. Application of direct-fitting, mass integral, and multirate methods to analysis of flowing fluid electric conductivity logs from Horonobe, Japan [J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): doi:10.1029/2007WR006441.
- [15] TSANG C F, DOUGHTY C. Multirate flowing fluid electric conductivity logging method [J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): doi:10.1029/2003WR002308.
- [16] DOUGHTY C, TSANG C F. Signatures in flowing fluid electric conductivity logs [J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/2/3/4): 157-180.
- [17] DOUGHTY C, TSANG C F, YABUUCHI S, et al. Flowing fluid electric conductivity logging for a deep artesian well in fractured rock with regional flow [J]. Journal of Hydrology, 2013, 482: 1-13.
- [18] DOUGHTY C, TSANG C F, ROSBERG J E, et al. Flowing fluid electrical conductivity logging of a deep borehole during and following drilling: estimation of transmissivity, water salinity and hydraulic head of conductive zones [J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(2): 501-517.
- [19] 李明, 缪海宾, 马明康, 等. 基于达西定律的渗流边坡稳定性分析 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 238-241. (LI Ming, MIU Haibin, MA Mingkang, et al. Stability analysis of seepage slope based on Darcy's law [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 238-241. (in Chinese))
- [20] 侯文高, 曹始友, 高旭波. 新安煤矿首采工作面顶板岩层富水性探测及涌水量评价 [J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊 2): 270-272. (HOU Wengao, CAO Shiyu, GAO Xubo. Water detection and water inflow evaluation of first coalface roof in Xin'an coal mine [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Sup2): 270-272. (in Chinese)) (收稿日期: 2022-04-28 编辑: 骆超)

(上接第 69 页)

- [14] LOPERTE A, SOLDVIERI F, PALOMBO A, et al. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at monte cotugno rock-fill dam (southern Italy) [J]. Engineering Geology, 2016, 211: 162-170.
- [15] YILMAZ S, KOKSOY M. Electrical resistivity imaging and dye tracer test for the estimation of water leakage paths from reservoir of akdegirmen dam in Afyonkarahisar, Turkey [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(24): 1-9.
- [16] 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 高密度电法的进展与展望 [J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 576-584. (YAN Jiayong, MENG Guixiang, LYU Qingtian, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 576-584. (in Chinese))
- [17] 刘晓, 彭友文, 袁志辉, 等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 71-75. (in Chinese))
- [18] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用 [J]. 地学前缘, 2003(1): 171-176. (DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and application of high density electric method [J]. Earth Science Frontiers, 2003(1): 171-176. (in Chinese))
- [19] 郭福钟, 朱瑞, 闫汝华, 等. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2264-2273. (GUO Fuzhong, ZHU Rui, YAN Ruhua, et al. Research of geological bim model based on 3d electrical resistivity tomography [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2264-2273. (in Chinese))
- [20] ALSHEHRI F, ABDELRAHMAN K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography [J]. Journal of King Saud University-Science, 2021, 33(5): 101468.
- [21] 陈建生, 董海洲. 堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [22] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 212: 136-145.
- [23] WANG T, CHEN J, LI P, et al. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam [J]. Engineering Geology, 2019, 249: 1-12.
- [24] WOLKERSDORFER C, GOEBEL J, HASCHE-BERGER A, et al. Assessing subsurface flow hydraulics of a coal mine water bioremediation system using a multi-tracer approach [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 164: 58-68. (收稿日期: 2022-03-29 编辑: 刘晓艳)

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2023.02.012

# 基于 LSTM 的泵闸工程混凝土施工期温度场预测

程井,孔垂穗,邹科辉

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**为了快速准确地预测混凝土施工期温度过程线,结合主成分分析,提出了一种基于长短期记忆网络(LSTM)算法的预测模型。以上海崇明岛四激港和八激港水闸底板为例,采用主成分分析对混凝土温度场的可能影响因素进行降维,建立以四激港水闸底板温度数据为基础的 LSTM 温度过程线预测模型并对输入主成分进行训练,将训练后的模型用于八激港温度过程线的拟合和预测并与实测结果进行对比。结果表明,该模型预测温度过程线与实际测点温度过程线拟合良好,均方根误差在 2℃ 以内,判定系数接近 1,预测结果符合工程精度要求。该预测模型可部分替代有限元反馈分析,从而提高泵闸混凝土温度场预测的效率。

**关键词:**泵闸结构;温控防裂;温度预测;深度学习;主成分分析;长短期记忆网络

**中图分类号:**TV331 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0076-06

**Temperature field prediction during concrete construction period of pump and sluice project based on LSTM//** CEHNG Jing, KONG Chuisui, ZOU Kehui(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** To quickly and accurately predict the temperature history during the concrete construction period, a prediction model based on the long short-term memory (LSTM) network algorithm was proposed combined with the principal component analysis (PCA). Taking the baseboard of the Siyaogang Sluice and Bayaogang Sluice in Shanghai Chongming Island as an example, the PCA method was used to reduce the number of the possible influencing factors of the concrete temperature field, and then the LSTM prediction model of temperature history based on the temperature data of the Siyaogang Sluice baseboard was established to train the input principal components. Then the trained model was used for the fitting and prediction of the temperature history of the Bayaogang Sluice and was compared with the measured results. The results show that the predicted value fits well with the measured one with the RSM error within 2℃ and the coefficient of determination close to 1, meeting the requirements of engineering accuracy. The proposed method can partially be an alternative for FEM back-analysis, which can increase the efficiency for concrete temperature field prediction of pump and sluice projects.

**Key words:** pump and sluice structure; temperature control and crack prevention; temperature prediction; deep learning; principal component analysis; long short-term memory

泵闸工程是平原地区最为常见的水利工程,其中施工期混凝土温度裂缝是泵闸结构面临的主要问题之一,其成因机理十分复杂,主要受胶凝材料水化过程、气候条件、施工方式、温控措施等影响<sup>[1]</sup>。随着计算机技术与现代物联网技术的发展,一些学者提出了智能温控理念<sup>[2]</sup>,给传统混凝土温控措施中粗放管理的不精细、不及时、费时费力等问题带来新思路。在混凝土智能温控系统中,工作人员需要对服务器大量实时温控数据进行分析,快速判断温度场情况并及时调整温控措施。因此,快速准确地预测温度过程线对温控工作人员及时调整温控措施、

降低混凝土开裂风险起到至关重要的作用<sup>[3]</sup>。混凝土温度预测一般采用温度场有限元分析,但该方法计算量较大,计算效率不能满足工程快速或实时分析的需要<sup>[4]</sup>。混凝土内部温度受到外界环境及本身水化放热影响而随时间不断变化,预测温度过程线本质是一个时间序列问题。近年来,机器学习发展迅速,深度学习作为机器学习的一个研究分支<sup>[5]</sup>,目前已应用于诸多领域的回归与分类任务中,使用深度学习网络求解时间序列预测问题的效果也十分优越。深度神经网络(deep neural networks, DNN)或循环神经网络(recurrent neural

**基金项目:**上海市水务局科研项目(沪水科 2021-09);贵州省水利科技经费项目(KT202217);国家重点研发计划(2022YFC3005501)

**作者简介:**程井(1982—),男,副教授,博士,主要从事水工结构计算力学研究。E-mail: cj042@126.com



network, RNN) 均可用于求解时间序列预测问题, 但前者存在一定缺陷, 不能很好地利用时间序列的相关性, 后者在求解时间序列问题时存在梯度消失与梯度爆炸的问题<sup>[6]</sup>。长短期记忆网络 (long short-term memory, LSTM) 是一种特殊的 RNN<sup>[7]</sup>, 可以有效记忆长系列历史数据规律, 解决梯度消失与梯度爆炸问题。

本文结合主成分分析 (principal component analysis, PCA), 提出一种基于 LSTM 算法的预测模型, 并对上海实际工程水闸底板进行了温度过程线拟合与预测, 验证了模型在泵闸混凝土施工期温度过程线预测中的有效性。

## 1 温度场影响因素的 PCA 输入特征选择

任何神经网络都是由输入到输出的映射模型, 因此要给 LSTM 模型提供输入值。对于混凝土施工期温度过程线预测问题来说, 混凝土温度过程线各时刻温度值即为输出值, 输入值为影响混凝土温度值的各种因素, 如材料参数、气候条件、施工条件等。一般来说, 训练样本包含的特征参数越多, 其所能表示的施工期信息就越完全, 从而得到更加准确的温度场预测结果。但特征参数过多会使样本占用大量资源, 分析维度的增加还会降低模型训练速度, 同时可能引入额外噪声, 但如果依靠主观想法仅选取部分特征参数又可能丢失重要信息。因此需要在平衡样本特征数量与训练效率的基础上, 对输入特征进行降维。PCA 利用较少的特征代表整个数据的分布, 新生成的特征是原有特征的线性组合, 因此该方法能在保留较多样本信息的情况下, 实现对高维数据的降维, 并消除输入特征量之间的相关性<sup>[8]</sup>。

影响泵闸结构施工期大体积混凝土温度的可能因素有很多<sup>[9]</sup>, 本文选取浇筑温度、冷却水流量、冷却水水温、空气温度、水胶比、外加剂、高程、砂率等 8 个影响因素, 对其进行 PCA 以实现特征降维。其中, 浇筑温度取各测区中各个测点位置温度计被混凝土覆盖后 15 ~ 20 min 后的温度值; 冷却水流量取水闸底板测点所在部位的两路进水管路实际输入流量的平均值; 冷却水水温取冷却水管两路进水口温度的平均值; 空气温度指当前大气温度, 取分别布置在阴凉环境和太阳直射环境下的两支温度计的平均测值; 高程指各测点相对于底板混凝土底面的高度, 该指标同时反映了测点与混凝土表面的距离。四激港及八激港水闸底板保温材料大体分为 3 层, 混凝土表面盖保水薄膜, 薄膜之上覆盖 3 ~ 4 cm 厚的保温棉被, 顶部覆盖土工布。各测区在浇筑过程中, 混凝土配合比、各测点所在高程及表面保温情况均保

持不变。

PCA 主要步骤如下: ①采用 KMO 检验法及 Bartlett 球度检验法<sup>[10]</sup> 判断所选数据集中各个特征是否具有相关性; ②对原始数据集标准化处理, 得到标准化数据集; ③基于标准化数据集, 建立协方差矩阵; ④求解协方差矩阵的特征值与特征向量, 确定主成分; ⑤计算各主成分的方差贡献率和累计方差贡献率。

在检验 PCA 的适应性时, 主要使用 Z-score 方法对原始数据进行标准化处理, 得到标准化数据, 然后通过 KMO 检验法及 Bartlett 球度检验法进行适应性检验, 判断所选数据是否满足 PCA 的使用条件。结果显示 KMO 值为 0.756, 说明所选数据指标之间具有一定相关性; Bartlett 球度检验法显著性值为 0。结合上述两项结果, 表明所选数据可以使用 PCA 进行降维。

## 2 温度场预测的 LSTM 基本原理及参数

LSTM 是一种特殊的 RNN, 它在 RNN 基础上引入了输入门、输出门和遗忘门 3 种门结构, 同时引入候选记忆细胞和记忆细胞来记录某些时刻的信息, 其单元结构如图 1 所示。

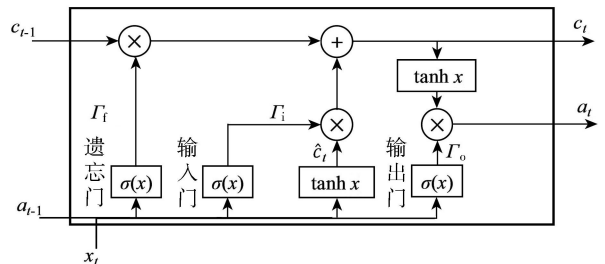


图 1 LSTM 单元结构

当前时刻的输入  $x_t$  与上一时刻的输出  $a_{t-1}$  先进入遗忘门。由于遗忘门以 Sigmoid 函数  $\sigma(x)$  作为激活函数<sup>[11]</sup>, 因此遗忘门限  $\Gamma_f$  的值域为  $[0, 1]$ 。遗忘门能够控制记忆消失程度, 当  $\Gamma_f = 0$  时, 表示完全丢弃该记忆; 当  $\Gamma_f = 1$  时, 表示完全保留该记忆; 当  $\Gamma_f \in (0, 1)$  时, 只保留部分记忆。 $\Gamma_f$  和  $\sigma(x)$  的计算公式分别如下:

$$\Gamma_f = \sigma(\mathbf{W}_f(a_{t-1}, x_t) + b_f) \quad (1)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{W}_f$  为遗忘门权重矩阵;  $b_f$  为对应偏差。

输入门用于确定需要保存在细胞状态中的新信息。此处需要更新两个变量, 输入门限  $\Gamma_i$  用于决定新信息入选程度,  $\hat{c}_t$  是生成的候选量<sup>[12]</sup>, 计算公式分别如下:

$$\Gamma_i = \sigma(\mathbf{W}_i(a_{t-1}, x_t) + b_i) \quad (3)$$

$$\hat{c}_i = \tanh(\mathbf{W}_c(a_{i-1}, x_i) + b_c) \quad (4)$$

$$\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{W}_i$ 、 $\mathbf{W}_c$  分别为输入门和候选记忆细胞的权重矩阵； $b_i$ 、 $b_c$  分别为输入门和候选记忆细胞的偏差； $\tanh x$  函数为激活函数。

根据遗忘门和输入门的输出结果，对当前时刻的细胞状态  $c_i$  进行更新：

$$c_i = \Gamma_i \hat{c}_i + \Gamma_i c_{i-1} \quad (6)$$

式中  $c_{i-1}$  为上一时刻的细胞状态。

输出门对输入  $x_i$  和隐藏层状态  $a_{i-1}$  执行 Sigmoid 函数，再对当前细胞状态执行  $\tanh x$  函数，两者相乘得到该 LSTM 隐藏层的输出值  $a_i$ ：

$$\Gamma_o = \sigma(\mathbf{W}_o(a_{i-1}, x_i) + b_o) \quad (7)$$

$$a_i = \Gamma_o \tanh c_i \quad (8)$$

式中： $\Gamma_o$  为输出门限； $\mathbf{W}_o$  为输出门权重矩阵； $b_o$  为输出门偏差。

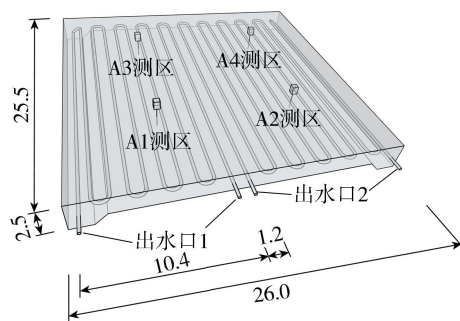
对于大体积混凝土温度场预测 LSTM 模型，输入参数包括混凝土材料配合比、施工期气温、浇筑温度、冷却水流量、冷却水水温的实测值序列、测点高程及对应时间段等，输出参数为实测混凝土温度序列。

## 3 实例应用

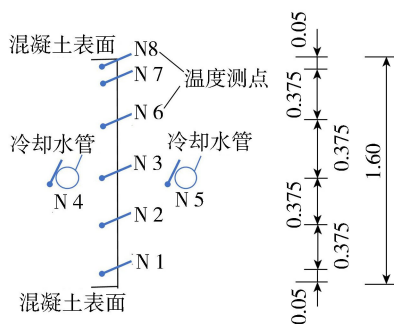
### 3.1 工程简介

以上海崇明岛四激港和八激港水闸底板温控为例开展温度场的预测研究。两座水闸均位于崇明岛堡镇港北沿三期北侧堤水平线位置，工程级别为 I 等，主要功能为防洪除涝，均于 2021 年浇筑，底板尺寸相同，长 26.0 m，宽 25.5 m，厚 1.6 ~ 2.5 m，4 个测温区混凝土底板厚度为 1.6 m，冷却水管布置两组管路，竖直方向居中布置，水平间距 0.8 ~ 1.2 m，冷却水管为内径 40 mm、外径 45 mm 的钢管。施工期采取表面保温及内部通水的综合温控措施。冷却水管及温度监测仪器的布置见图 2，其中 A1 ~ A4 为水闸底板 4 个测区，每测区布置 N1 ~ N8 共 8 个温度测点，四激港和八激港水闸底板测区测点布置相同。气温、混凝土温度、冷却水的温度及流量等温控数据的采集频次设置为 30s/次，存储频次为 20 min/次，混凝土温控数据均已在施工期采集完毕。施工期气温范围为 -7.9 ~ 20.0℃，混凝土浇筑温度范围为 9.80 ~ 12.31℃，冷却水流量范围为 4.5 ~ 6.4 m<sup>3</sup>/h，冷却水水温范围为 5.3 ~ 25.0℃，各测区测点温度计间隔

距离为 0.050 ~ 0.375 m。相关混凝土配合比见表 1。



(a) 冷却水管示意图



(b) 温度测点布置

图 2 冷却水管及温度监测布置(单位:m)

### 3.2 PCA 结果

对四激港、八激港工程水闸底板选取浇筑温度、冷却水流量、冷却水水温、空气温度、水胶比、外加剂、高程、砂率等 8 个混凝土温度场影响因素进行主成分分析，各影响因素数据同时来自两个工程，占比为 1 : 1，得到 PCA 碎石图(图 3)及各成分方差贡献率等数据(表 2)。主成分确定的依据有两种：一种是将对应特征值大于 1 的成分作为主成分，另一种是将累计方差贡献率超过 85% 的成分作为主成分<sup>[13]</sup>。理想情况下，主成分应同时满足上述两项标准。当所选主成分不能同时满足两项标准时，优先考虑满足累计方差贡献率。

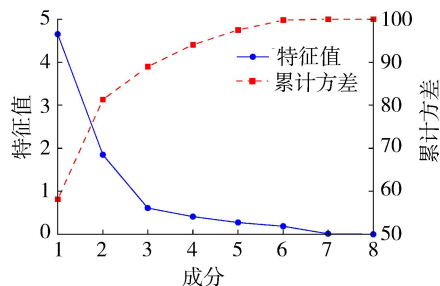


图 3 PCA 碎石示意图

表 1 四激港、八激港水闸底板混凝土配合比

工程	混凝土标号	坍落度/mm	水/kg	水泥/kg	粉煤灰/kg	矿粉/kg	砂/kg	石/kg	外加剂/kg	水胶比
四激港	C35	140±20	168	280	93	93	756	1044	4.48	0.45
八激港	C35	140±20	175	287	117	0	730	1035	5.88	0.43

表2 各成分方差贡献率及累计方差贡献率

成分	特征值	方差贡献率%	累计方差贡献率%
1	4.654	58.170	58.170
2	1.850	23.124	81.294
3	0.613	7.667	88.961
4	0.409	5.107	94.068
5	0.274	3.419	97.487
6	0.188	2.347	99.834
7	0.012	0.150	99.984
8	0.001	0.016	100.000

由图3和表2可知,特征值大于1的成分有2个,但对应的累计方差贡献率只有81%,所以仅选用2个成分难以代表整个数据集的特征。为提高主成分对整体数据的代表性,考虑将成分3也作为主成分,此时累计方差贡献率达到88.96%,满足累计方差贡献率要求。3个主成分的成分矩阵元素见表3。

表3 3个主成分的成分矩阵元素

影响因素	矩阵元素		
	主成分1	主成分2	主成分3
外加剂掺量	-0.942	0.302	0.083
水胶比	0.937	-0.302	-0.085
砂率	0.889	-0.429	-0.087
冷却水流量	-0.881	0.251	0.099
浇筑温度	0.638	0.628	-0.014
高程	0.459	0.719	0.017
空气温度	0.492	0.700	-0.305
冷却水水温	0.679	0.140	0.699

由表3可以看出,主成分1与外加剂掺量、水胶比、砂率和冷却水流量相关程度很高,即主成分1主要代表混凝土材料配比及通水流量的影响。主成分2与浇筑温度、空气温度及高程的相关性较高,即主成分2主要代表外界环境与混凝土高程位置的影响。主成分3则主要代表冷却水水温的影响。结合表2主成分的特征值及表3的各主成分系数,计算得出主成分表达式。通过主成分表达式将原本的8个特征转换为3个特征,将这3个特征作为模型的输入数据,建立并训练LSTM模型。

### 3.3 LSTM模型预测

基于PCA结果和温控信息数据库中的实测数据,对八激港工程水闸底板A4测区温度过程线进行预测。模型训练集采用同期浇筑的四激港工程水闸底板4个测区的混凝土温度数据,并采用Adam算法<sup>[14]</sup>作为优化算法。

#### 3.3.1 模型训练

LSTM模型主要包括输入层、LSTM层及全连接层。对模型的超参数进行试验,训练模型隐藏层数量为20,全连接层数量为1,学习率设定为0.001,训练轮数为100轮,每次训练所抓取的数据样本数量为64,其余参数采用默认值。为衡量模型输出的预测值

与真实值之间的误差,选用均方根误差RMSE和判定系数 $R^2$ 作为模型预测效果的评价指标。

LSTM训练模型先以四激港工程水闸底板4个测区共计24个测点的混凝土温度数据作为训练集,自底板开始浇筑,各测区每个测点分别采集1498条温度数据,24个测点共计35952条温度数据,按照70%和30%的比例划分为训练集和验证集。经过100轮训练后,将训练结果与各自实际温度过程线进行对比,其中1号测区部分测点的对比情况如图4所示,横坐标采集次数即为温控数据的存储频次,每20min采集1次。由图4可见,训练模型有效学习了训练样本中的规律,基于模型拟合的温度过程线与测点实测过程线基本一致。其中测点2、3、6、7除开始浇筑部分的时段偏差稍大,进入温度上升段后拟合良好。

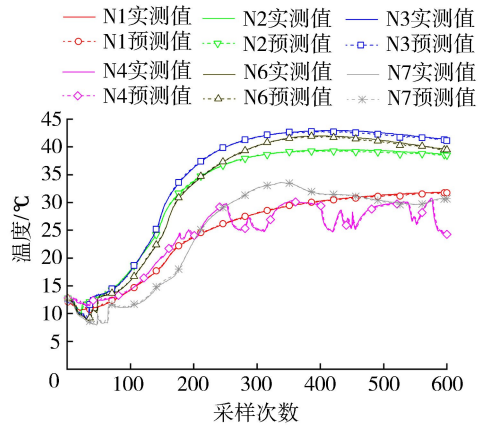


图4 训练结果与实测温度过程线对比

RMSE表示模型预测值与实测值之间的离散程度,RMSE越小代表模型越稳定; $R^2$ 表示模型预测值与实测值的拟合效果,取值范围为 $[0,1]$ ,该值越接近1,表明模型拟合效果越好。四激港4个测区24个测点的RMSE值和 $R^2$ 值如表4所示,其中A1测区测点RMSE值均在 $0.71^\circ\text{C}$ 以下,其余测区测点RMSE值均在 $0.55^\circ\text{C}$ 以下, $R^2$ 值均接近1,表明模型训练效果良好。

表4 四激港24个测点RMSE值和 $R^2$ 值

测点	RMSE/ $^\circ\text{C}$				$R^2$			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
N1	0.336	0.083	0.174	0.106	0.723	0.987	0.950	0.982
N2	0.534	0.347	0.240	0.160	0.877	0.954	0.980	0.991
N3	0.708	0.349	0.219	0.120	0.905	0.977	0.991	0.998
N4	0.354	0.343	0.198	0.137	0.913	0.925	0.974	0.988
N6	0.622	0.547	0.295	0.231	0.930	0.965	0.983	0.994
N7	0.501	0.387	0.238	0.220	0.913	0.968	0.991	0.990

#### 3.3.2 模型预测

基于训练好的LSTM模型和温控信息数据库中的实测数据,对八激港工程水闸底板A4测区中的

6个测点温度过程线进行预测,每个测点采集281条温度数据,6个测点共1686条温度数据。由于训练误差与泛化误差没有必然联系,因此需要将训练模型应用于测试集进行预测,以检验模型的泛化能力。测试集中6个测点的计算结果如图5所示。各测点的RMSE值和 $R^2$ 值见表5。

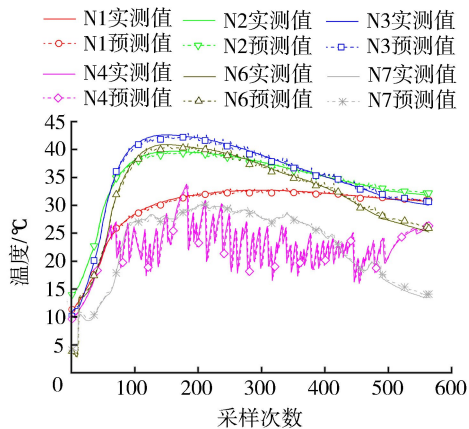


图5 模型预测与实测温度过程线对比

表5 各测点RMSE值和 $R^2$ 值

测点编号	RMSE/°C	$R^2$	测点编号	RMSE/°C	$R^2$
N1	0.236	0.978	N4	1.614	0.825
N2	0.304	0.977	N6	0.472	0.971
N3	0.388	0.978	N7	0.478	0.967

从图5可以看出,模型预测温度过程线与6个测点实际温度过程线拟合良好,能反映出其实际温度变化趋势。各测点中N4位于水管壁,波动幅度很大,对模型预测效果影响较大,其RMSE值为1.614°C,但RMSE值仍在2°C以内。靠近混凝土上表面的N6、N7测点,由于受到实际太阳光照和风速等各种复杂因素影响,相比N1、N2、N3测点, RMSE值稍偏大, RMSE值在0.5°C以内。其余各测点受水温直接影响较小, RMSE值均在0.39°C以下,各测点 $R^2$ 值均接近于1,表明模型可以很好地分析其变化规律,预测值与实测值拟合效果较好,不存在过拟合问题,模型预测效果良好。

综上,结合PCA建立的LSTM预测模型对泵闸底板混凝土施工期温度场预测有很强的泛化能力与适用性,且预测结果符合工程精度要求,可用于同类型工程混凝土温度场预测。由图5可见,混凝土早龄期的模型预测结果偏差稍大,主要是因为早期混凝土水化速率较快、离散性大。该阶段对于混凝土最高温度及内外温差的控制尤为重要,后续可进一步采用变步长模型进行研究。另外,LSTM预测模型需要依靠大量实测数据,而温控数据库可能存在样本个体差异及数据缺失等问题,后期可考虑与有限元分析相结合,构建“数据+机理”耦合驱动的温度场预测模

型,从而提高模型的外推能力及预测精度。

## 4 结语

本文结合PCA,提出了一种基于LSTM算法的泵闸工程混凝土施工期温度场预测模型,并以上海某工程水闸底板为例进行了温度过程线的拟合与预测。结果表明:①典型算例的LSTM模型预测效果良好,判定系数接近1,水管壁处测点均方根误差在2°C以内,靠近混凝土上表面测点均方根误差在0.5°C以内,其余各测点均方根误差均在0.39°C以下,能够满足工程精度要求;②LSTM模型具有很强的泛化能力和适用性,能够提高分析预测效率,可部分替代温度场有限元正分析,在泵闸混凝土施工期温度过程线预测中具备可行性,可应用于同类型工程;③太阳辐射热以及现场风速对混凝土施工期温度场影响较大,但两者具有较大的时间和空间不确定性,受现场条件限制目前尚未纳入考虑,后续应用中可在模型中增加这两类信息,从而进一步提高温度场的预测精度。

## 参考文献:

[1] 程井,魏李威,张玉鑫,等. 基于水化度的泵送混凝土温升模型及参数反演[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):75-81. (CHENG Jing, WEI Liwei, ZHANG Yuxin, et al. Temperature rise model for pumped concrete based on hydration degree and parameter inversion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(2):75-81. (in Chinese))

[2] 钟登华,时梦楠,崔博,等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):38-52. (ZHONG Denghua, SHI Mengnan, CUI Bo, et al. Research progress of the intelligent construction of dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019,50(1):38-52. (in Chinese))

[3] 黄建文,李飞翔,袁华,等. 高拱坝混凝土一期控温阶段温度变化动态预测方法[J]. 长江科学院院报,2022,39(2):141-146. (HUANG Jianwen, LI Feixiang, YUAN Hua, et al. Dynamically predicting temperature change in the first phase temperature control stage for high arch dam concrete [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022,39(2):141-146. (in Chinese))

[4] 郭生根,周双喜. 基于有限元仿真及神经网络模型相结合的大体积混凝土温度预测方法[J]. 水利水电技术,2018,49(11):188-196. (GUO Shenggen, ZHOU Shuangxi. Study on temperature evolution rule and prediction method of mass concrete under natural condition [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(11):188-196. (in Chinese))

[5] 余凯,贾磊,陈雨强,等. 深度学习的昨天、今天和明天

- [J]. 计算机研究与发展,2013,50(9):1799-1804. (YU Kai, JIA Lei, CHEN Yuqiang, et al. Deep learning: yesterday, today, and tomorrow [J]. Journal of Computer Research and Development,2013,50(9): 1799-1804. (in Chinese))
- [6] BENGIO Y, SIMARD P, FRASCONI P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1994,5(2):157-166.
- [7] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [8] 周松林, 茆美琴, 苏建徽. 基于主成分分析与神经网络的风电功率预测[J]. 电网技术,2011,35(9):128-132. (ZHOU Songlin, MAO Meiqin, SU Jianhui. Prediction of wind power based on principal component analysis and artificial neural network [J]. Power System Technology,2011,35(9):128-132. (in Chinese))
- [9] 黄耀英, 丁月梅, 吕晓曼, 等. 闸墩混凝土结构温控防裂措施智能优选研究[J]. 中国工程科学,2014,16(3):59-63. (HUANG Yaoying, DING Yuemei, LYU Xiaoman, et al. Intelligent optimization of temperature control and crack prevention measures for sluice pier concrete structure [J]. Engineering Sciences, 2014, 16(3):59-63. (in Chinese))
- [10] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. 统计教
- 育,2007(9):4-7. (FU Deyin. Statistical testing problems in principal component analysis[J]. Statistical Education, 2007(9):4-7. (in Chinese))
- [11] 蒋昂波, 王维维. ReLU 激活函数优化研究[J]. 传感器与微系统,2018,37(2):50-52. (JIANG Angbo, WANG Weiwei. Research on optimization of ReLU activation function [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2018,37(2):50-52. (in Chinese))
- [12] 欧斌, 吴邦彬, 袁杰, 等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(1):21-26. (in Chinese))
- [13] 公丽艳, 孟宪军, 刘乃侨, 等. 基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J]. 农业工程学报,2014,30(13):276-285. (GONG Liyan, MENG Xianjun, LIU Naiqiao, et al. Evaluation of apple quality based on principal component and hierarchical cluster analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(13):276-285. (in Chinese))
- [14] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization [C]//International Conference on Learning Representations. Ithaca:NYarXiv, 2014.
- (收稿日期:2022-05-26 编辑:骆超)
- 
- (上接第 50 页)
- [13] 陈志波, 朱俊高. 两河口心墙堆石坝应力变形及参数敏感性三维有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版),2010,38(6):893-899. (CHEN Zhibo, ZHU Jungao. Three-dimensional finite element analysis on stress-strain and materials parameters sensibility of Lianghekou core rockfill dam [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition),2010,38(6):893-899. (in Chinese))
- [14] 李火坤, 王刚, 魏博文, 等. 基于敏感性分析与粒子群算法的拱坝原型动弹性模量反演方法[J]. 水利学报,2020,51(11):1401-1411. (LI Huokun, WANG Gang, WEI Bowen, et al. Inversion of prototype dynamic elastic modulus of arch dam based on sensitivity analysis and particle swarm optimization [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(11):1401-1411. (in Chinese))
- [15] 李炎隆, 张敬华, 张再望, 等. 基于正交试验法的高模量区 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):34-38. (LI Yanlong, ZHANG Jinghua, ZHANG Zaiwang, et al. Sensitivity analysis of E-B model parameters in high modulus zone based on orthogonal test method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(1):34-38. (in Chinese))
- [16] 陈辉, 刘东海, 戚蓝. 改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):406-412. (CHEN Hui, LIU Donghai, QI Lan. Improved sensitivity analysis method for calculating the deformation parameters of the rock-fill dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(5):406-412. (in Chinese))
- [17] MARA T A, TARANTOLA S. Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations [J]. Building Simulation, 2008, 1(4): 290-302.
- [18] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [19] 赵胜利. 正规部分因子设计的最优性理论与构造方法 [J]. 应用概率统计, 2015, 31(3): 320-336. (ZHAO Shengli. The optimality theories and construction methods on regular fractional factorial designs [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics,2015,31(3):320-336. (in Chinese))
- [20] 闵亚能. 实验设计 (DOE) 应用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- (收稿日期:2022-05-25 编辑:俞云利)

# 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选

杨志豪<sup>1,2</sup>, 何建新<sup>1,2</sup>, 李志华<sup>3</sup>, 杨武<sup>1,2</sup>, 卢建南<sup>1,2</sup>

- (1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆绿翔建设工程集团有限责任公司, 新疆 额敏 834601)

**摘要:** 针对沥青混凝土配合比设计方案优选过程易受主观因素影响导致结果不确定和最优方案选择难的问题, 以乔拉布拉沥青混凝土心墙工程配合比设计为例, 将配合比评价指标的综合效益作为目标, 提出了投影寻踪回归 (PPR) 建模技术与基于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合的配合比优选方法 (PPR-TOPSIS 分析法)。结果表明: 构建的沥青混凝土评价指标 PPR 模型计算精度高, 合格率达 93.1%, 平均相对误差为 2.01%, 可对不同因素水平组合的配合比方案的评价指标进行精确预测; 利用 PPR-TOPSIS 分析法得到的最优配合比方案试验结果满足规范标准, 相较传统的设计方法减少了人为主观因素影响并实现了全试验因素水平组合的方案寻优及定量评价, 得到的配合比方案更为合理。

**关键词:** 沥青混凝土; 配合比方案优选; PPR 建模技术; TOPSIS 评价法

**中图分类号:** TV431<sup>+</sup>.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)02-0082-07

**Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis//** YANG Zhihao<sup>1,2</sup>, HE Jianxin<sup>1,2</sup>, LI Zhihua<sup>3</sup>, YANG Wu<sup>1,2</sup>, LU Jiannan<sup>1,2</sup> (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Lyuxiang Construction Engineering Group Co., Ltd., Emin 834601, China)

**Abstract:** Aiming at the uncertainty in the results of the scheming optimization process influenced by subjective factors and the problem of optimal scheme selection during asphalt concrete mix designing, taking the mix design of the Qiaolabula asphalt concrete core wall project as an example, the projection pursuit regression (PPR) modelling technique combined with the TOPSIS comprehensive evaluation method based on entropy weights (PPR-TOPSIS analysis method) was proposed for the comprehensive benefits of the mix evaluation indexes. The results show that the established PPR model for asphalt concrete evaluation indexes is highly accurate in calculation, with a pass rate of 93.1% and an average relative error of 2.01%, which can accurately predict the evaluation indexes of the mix ratio schemes with different combinations of factor levels. The test results of the best mix ratio scheme analyzed by the PPR-TOPSIS comprehensive evaluation method can satisfy the specification criteria. Compared with the traditional design method, the influence of human subjective factors can be reduced and the solution search and quantitative evaluation of the combination of all test factors can be realized by the proposed method, and the obtained ratio solution is more reasonable.

**Key words:** asphalt concrete; optimization of mix proportion; PPR technique; TOPSIS evaluation method

沥青混凝土心墙坝拥有诸多优点, 在土石坝的选型中占据重要地位<sup>[1]</sup>, 目前全世界已建设了 200 多座沥青混凝土心墙坝, 具有很大的发展潜力<sup>[2]</sup>。沥青混凝土心墙作为坝体的防渗结构, 保证其安全稳定是沥青混凝土配合比设计的核心内容之一。科学、合理的配合比设计及优选方法对于提高沥青混

凝土配合比设计结果的可靠性具有重要意义。

沥青混凝土的配合比设计方法是配合比方案优选的关键。传统的设计方法是通过设计正交试验, 对评价指标进行极差、方差分析, 选出评价指标达最优时的因素水平组合<sup>[3-4]</sup>, 该方法试验量较少, 优选结果较为理想, 但无法探寻各影响因素相互作用的

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01A100); 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究项目(ZDSYS-YJS-2021-03)

**作者简介:** 杨志豪(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事沥青混凝土材料配合比设计及静力特性研究。E-mail:1198196930@qq.com

**通信作者:** 何建新(1973—), 男, 副教授, 硕士, 主要从事沥青混凝土材料防渗性能及力学特性研究。E-mail:604690896@qq.com

平衡点,也无法对评价指标值进行有效预测。全试验设计方法能够得到各配合比方案的真实观测值,对于揭示各因素对评价指标的影响规律及对比分析优选配合比参数更具可靠性,但试验量显著增多<sup>[5-6]</sup>。随着新型建模技术的发展<sup>[7]</sup>,基于正交试验设计,投影寻踪回归建模技术在胶凝材料的配合比优选和设计参数的单因素分析方面的应用逐渐被开发出来<sup>[8-10]</sup>。此方法能够有效挖掘高维数据的内部特征,并通过仿真计算实现试验范围内不同因素水平对应的计算指标的预测,预测结果精度较高<sup>[11]</sup>,在沥青混凝土配合比设计方面有较大的应用潜力。

沥青混凝土配合比方案的优选实际上就是多目标决策问题,优选过程涉及的评价指标较多,如孔隙率、劈裂位移<sup>[5,12]</sup>、马歇尔稳定度、流值、孔隙率<sup>[4,13]</sup>及劈裂强度<sup>[3,14]</sup>。然而上述试验设计方法针对单一目标的方案优选有显著优势,当涉及多目标决策时,配合比方案的优选过程受人为主观因素影响强烈,优选结果难以直接判断且因人而异,可能会偏离理想解。传统的优劣解距离评价方法(TOPSIS评价法)是多目标决策分析评价中应用较为广泛的方法<sup>[15]</sup>,通过测算各配合比方案与“正理想解”和“负理想解”的接近程度对其进行排序,具有易操作、结果可靠等优点,为沥青混凝土配合比方案的定量评价提供了理论依据。

本文以乔拉布拉水库沥青混凝土心墙的配合比设计为例,采用PPR建模技术对正交试验结果进行分析,构建试验因素与评价指标的计算模型(PPR模型),并对全因素水平组合的配合比方案的评价指标进行仿真计算,再结合基于熵权的TOPSIS综合评价法对方案评价指标的综合效益进行计算,优选出配合比方案并验证该方案的可行性和本文方法的先进性。

## 1 试验方案设计

### 1.1 工程概况及原材料

乔拉布拉水库位于新疆额敏河流域中段北部的额敏县境内,工程区多年平均温度为5.9℃,地震基本烈度为Ⅶ度。大坝采用碾压式沥青混凝土心墙与灌浆帷幕联合防渗结构,最大坝高81.5m,工程等别为Ⅳ等。室内沥青混凝土配合比试验所用骨料由工程区碱性料场提供,沥青采用库车90号A级道路石油沥青,填料由破碎后的骨料经磨细后筛分所得,各项原材料的技术指标经检验均满足SL501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》要求。

### 1.2 评价指标及试验方法

用于土石坝心墙结构的沥青混凝土,需要具备较高的强度、良好的防渗性能和较强的适应变形能力<sup>[5,13]</sup>。根据伦聚斌等<sup>[3-5,12-14]</sup>对沥青混凝土配合比设计的研究成果,本文选取马歇尔稳定度及流值、孔隙率和劈裂抗拉强度作为沥青混凝土配合比的优选评价指标,其中马歇尔稳定度和劈裂抗拉强度为强度指标,马歇尔流值为变形指标,孔隙率为防渗指标,前两种指标为正指标,最后一种指标为负指标。上述评价指标相较渗透系数、黏聚力、内摩擦角、抗弯强度和弯拉应变等指标,在反映沥青混凝土工程性能的同时,所涉及的试验更快捷更易操作,而且在心墙铺筑过程中还便于施工质量的检验。

根据选定的4个评价指标,按DL/T5362—2018《水工沥青混凝土试验规程》规定的试验方法,制备沥青混凝土马歇尔标准试件(∅101.6mm×63.5mm),测定各评价指标的试验值,最终结果取3次平行试验的平均值。马歇尔试验温度取40℃,劈裂抗拉试验温度取10℃,加载速率均为50mm/min。

### 1.3 试验方案与试验结果

水工沥青混凝土配合比设计包括矿料级配的设计和沥青用量的选择。矿料级配设计主要依据丁朴荣<sup>[16]</sup>提出的计算公式(式(1)),本文骨料最大粒径为19mm,在此情况下,配合比设计就是选择合理的级配指数、填料用量和沥青用量。根据姜春萌等<sup>[9]</sup>在PPR建模方面的研究成果可知,由应用均匀正交思想选择的建模样本所建立的PPR模型的建模效果较为理想,因此本文将级配指数、填料用量和沥青用量作为3个因素,设计正交试验表进行配合比试验。根据SL501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》中推荐的碾压式沥青混凝土心墙配合比设计参数范围,再结合设计要求及新疆多个沥青混凝土心墙配合比使用经验,本文拟定级配指数分别为0.36、0.39和0.42,填料用量分别为11%、13%和15%,由于沥青用量对沥青混凝土性能的影响显著,拟定沥青用量*B*分别为6.3%、6.6%、6.9%和7.2%。

$$P_i = F + (100 - F) \frac{d_i^r - 0.075^r}{D_{\max}^r - 0.075^r} \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为孔径 $d_i$ 筛的通过率; $F$ 为粒径小于0.075mm的填料的用量; $D_{\max}$ 为骨料最大粒径; $d_i$ 为某一筛孔尺寸; $r$ 为级配指数。

综上所述,选用3因素混合水平共计12个试验方案的正交试验表安排试验,同时为验证PPR模型的稳定性,还需增设一些试验方案<sup>[11]</sup>,最终试验方案与试验结果见表1。

表1 试验方案与试验结果

方案编号	级配指数	填料用量/%	沥青用量/%	孔隙率/%	稳定度/kN	流值/mm	劈裂抗拉强度/MPa
1	0.36	11	6.3	1.32	9.74	4.86	0.656
2	0.42	13	6.3	1.42	9.56	4.98	0.624
3	0.39	15	6.3	1.32	9.38	5.54	0.670
4	0.42	11	6.6	1.33	10.41	5.93	0.594
5	0.39	13	6.6	1.41	9.18	6.09	0.560
6	0.36	15	6.6	1.31	7.77	6.74	0.602
7	0.39	11	6.9	1.23	9.69	6.35	0.542
8	0.36	13	6.9	1.19	8.28	6.16	0.534
9	0.42	15	6.9	1.14	7.58	6.71	0.562
10	0.36	11	7.2	1.08	8.73	6.44	0.506
11	0.42	13	7.2	1.18	7.53	6.82	0.494
12	0.39	15	7.2	1.14	7.43	7.26	0.478
13	0.36	12	6.5	1.25	9.76	5.26	0.582
14	0.42	14	6.5	1.27	8.95	5.55	0.595
15	0.39	12	6.7	1.26	9.45	5.86	0.546
16	0.36	14	6.7	1.22	8.44	6.15	0.576
17	0.39	12	7.0	1.19	8.75	6.34	0.490
18	0.42	14	7.0	1.15	8.21	6.48	0.498

注:编号1~12为本文正交试验设计的试验方案;编号13~18为验证PPR模型稳定性和计算精度而增设的试验方案。

## 2 PPR 建模及仿真计算

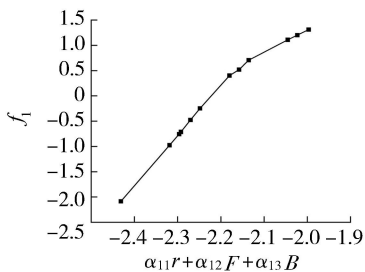
### 2.1 基本原理

PPR 是一种将高维数据进行降维以极小化投影结果与实测结果的偏差为准则,找寻有效反映数据结构特征的投影来分析描述高维数据的探索性数据分析(exploratory data analysis, EDA)方法<sup>[7]</sup>。设  $(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  是一组随机变量,其中  $\mathbf{Y}$  是  $Q$  维随机变量,  $\mathbf{X}$  是  $P$  维随机变量,PPR 建模技术即根据观测结果采用一系列岭函数对投影方向上的  $\mathbf{X}$  随机变量进行加权平均来逼近回归函数  $F(\mathbf{x})$ :

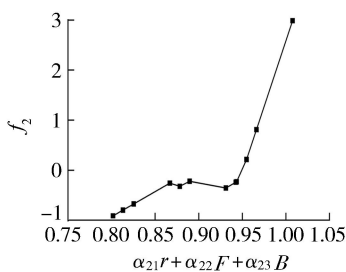
$$F(\mathbf{x}) = E(y_i | x_1, x_2, \dots, x_p) = \bar{y}_i + \sum_{j=1}^M \beta_j f_j(\sum_{k=1}^P \alpha_{jk} x_k) \quad (2)$$

式中:  $x_k$  为第  $k$  个自变量 ( $k=1, 2, \dots, P$ );  $y_i$  为第  $i$  个因变量 ( $i=1, 2, \dots, Q$ );  $\bar{y}_i$  为第  $i$  个因变量  $n$  次观测结果的均值;  $f_j$  为第  $j$  个岭函数,且满足  $E(f_j) = 0$ ,  $E(f_j^2) = 1$ ;  $M$  为探寻的岭函数上限数量;  $\beta_j$  为第  $j$  个岭函数的权重;  $\alpha_{jk}$  为第  $j$  个投影方向上第  $k$  个分量。

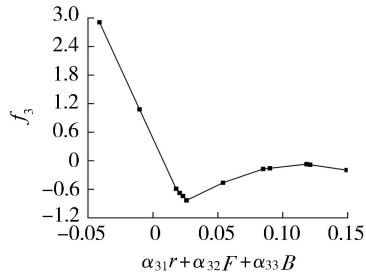
PPR 实现过程中以满足式(3)极小化准则为约



(a)  $f_1$



(b)  $f_2$



(c)  $f_3$

图1 PPR 模型岭函数

束,对上述参数进行分层分组迭代交替优化,最终估计出各岭函数及其权重,以及  $\mathbf{X}$  的投影方向。PPR 建模技术的具体实现步骤见文献[9]。

$$\min L = \sum_{i=1}^Q w_i E \left[ (y_i - E y_i) - \sum_{j=1}^{M_u} \beta_j f_j \left( \sum_{k=1}^P \alpha_{jk} x_k \right) \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $M_u$  为最优岭函数个数;  $w_i$  为因变量权重。其他物理量含义见文献[9]。

### 2.2 建模过程

将配合比设计参数  $r, F, B$  作为自变量,4 个评价指标作为因变量,取表1中前12个方案作为建模样本,采用编制的PPR计算机程序进行建模计算,并采用后6个方案来分析模型的稳定性。以稳定度指标为例,经计算模型投影参数分别为:  $P=3, Q=4, S=0.5, M=5, M_u=3$ 。其中,  $S$  为光滑系数,决定了模型灵敏度,取值范围为  $0 < S < 1$ ,  $S$  值越小模型越灵敏,以Gong等<sup>[10]</sup>提出的精度一致检验法准则为依据,取模型计算值与实测值相对误差小于或等于5%为合格率判定标准,在模型具有较好的稳定性条件下,试算确定其具体取值;  $M$  和  $M_u$  决定了模型找寻数据内部特征的精细程度。

建模计算过程中求得的模型投影方向见式(4),模型的岭函数如图1所示,各岭函数权重分别为0.8078、0.5878、0.4848。将式(4)、图1所示的岭函数和各岭函数权重代入式(2),得到稳定度的计算模型,同理可求得沥青混凝土其他评价指标的计算模型。除此之外,建模计算过程中还可以求出各影响因素对不同评价指标的相对权重,见表2。

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08061 & -0.00978 & -0.99670 \\ -0.08736 & -0.01215 & 0.99610 \\ -0.01385 & -0.00663 & 0.99989 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  分别为  $f_1, f_2, f_3$  岭函数条件下稳定度的投影方向。

由表2可得,沥青用量对各评价指标的影响程度最大,采用极差分析法对表1中的试验结果进行



表2 各评价指标影响因素的相对权重

评价指标	影响因素权重		
	填料用量	级配指数	沥青用量
稳定度	0.767	0.380	1.000
流值	0.376	0.408	1.000
孔隙率	0.229	0.127	1.000
劈裂抗拉强度	0.359	0.151	1.000

分析可以得到相同的结论,进一步验证了上述结论的可靠性。

### 2.3 PPR 模型精度分析

将试验方案中的建模和检验样本代入 PPR 模型中对各评价指标进行计算并与实测值比较,来分析模型的计算精度,限于篇幅,将所得结果标准化处理后绘于图 2 中。由图 2 可得,所有指标建模和检验样本的计算值与实测值偏差均较小,以 5% 相对误差为标准,合格率为 93.1%,平均相对误差为 2.01%,表明本文建立的 PPR 模型对各评价指标均有较高的计算精度,能够较精确地预测不同因素水平组合的配合比方案的评价指标值,再结合表 2 所得结果,证明了 PPR 建模技术在试验数据内部结构特征挖掘方面的优势。

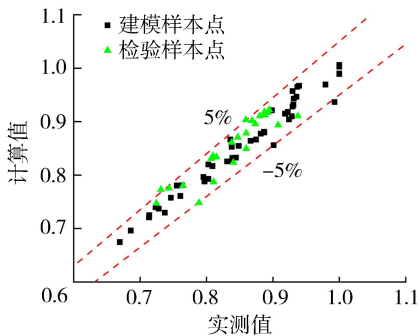


图2 PPR 模型精度分析

## 3 配合比方案优选

### 3.1 基于熵权的 TOPSIS 综合评价法

传统的 TOPSIS 评价法主要采用主观赋权法给评价指标定权,但该方法受人为主观因素影响可能会造成评价结果与实际情况出现偏差<sup>[17]</sup>。与主观赋权法相比,熵值赋权法能够基于评价指标的原始信息求得权重,避免了人为主观因素的干扰,降低了评价指标的权重误差,使评价结果与实际情况更契合<sup>[18]</sup>。因此,本文采用熵值赋权法给各评价指标定权。基于熵权的 TOPSIS 综合评价法步骤如下<sup>[15,17]</sup>：

**步骤 1** 建立初始评价指标矩阵: 假设有  $V$  项评价指标和  $N$  个评价方案, 构成初始数据指标矩阵  $\mathbf{X}=(x_{ij})_{N \times V}$ , 其中  $x_{ij}$  为第  $i(i=1,2, \dots, N)$  个评价方案对应的第  $j(j=1,2, \dots, V)$  项指标值。

**步骤 2** 计算初始指标值占比。将指标值  $x_{ij}$  除

以对应列各行元素之和  $\sum_{i=1}^N x_{ij}$ , 得到处理后的指标值  $r_{ij}$ 。

**步骤 3** 计算各指标的信息熵  $E_j$  和信息效用值  $d_j$ :

$$E_j = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N (r_{ij} \ln r_{ij}) \quad (5)$$

$$d_j = 1 - E_j \quad (6)$$

**步骤 4** 计算各指标的权重。将信息效用值  $d_j$  除以信息效用值总和  $\sum_{j=1}^V d_j$ , 得到各指标权重  $w_j$ 。

**步骤 5** 规范化初始矩阵。将指标值  $x_{ij}$  与指标矩阵最小指标值的差除以指标矩阵的极差, 得到正指标规范化矩阵  $G^+$ ; 将指标矩阵最大指标值与指标值  $x_{ij}$  的差除以指标矩阵的极差, 得到负指标规范化矩阵  $G^-$ 。

**步骤 6** 构造加权矩阵。将  $G^+$  和  $G^-$  分别与对应的指标权重相乘再组合, 得到加权矩阵  $G^*$ 。

**步骤 7** 寻找各指标最优、最劣解, 建立正理想解向量  $G^{*+}$  和负理想解向量  $G^{*-}$ :

$$\begin{cases} G_{ij}^{*+} = \max G_{ij}^* \\ G_{ij}^{*-} = \min G_{ij}^* \end{cases} \quad (7)$$

**步骤 8** 计算第  $i$  个评价方案与正、负理想解的距离  $D_i^+, D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^V (G_{ij}^* - G_j^{*+})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^V (G_{ij}^* - G_j^{*-})^2} \quad (9)$$

式中  $G_j^{*+}, G_j^{*-}$  分别为第  $i$  个评价方案对应的指标最优解和最劣解。

**步骤 9** 计算各方案的相对接近度:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (0 \leq C_i \leq 1) \quad (10)$$

**步骤 10** 方案优选。方案的相对接近度越大, 则综合得分越高, 该方案越接近最理想方案。

### 3.2 沥青混凝土配合比方案优选

在试验设计的 18 个配合比方案的基础上, 再考虑其他因素水平组合, 构成全因素水平组合, 共计 36 个配合比方案, 将其代入 PPR 模型对各评价指标进行仿真计算, 计算结果如图 3 所示。根据基于熵权的 TOPSIS 综合评价法, 求得孔隙率、流值、稳定度及劈裂抗拉强度的权重分别为 0.152、0.272、0.294 和 0.281, 并计算得出各配合比方案对应的综合得分, 如图 4 所示。

由图 3 可知, 方案 9 稳定度最优, 劈裂抗拉强度

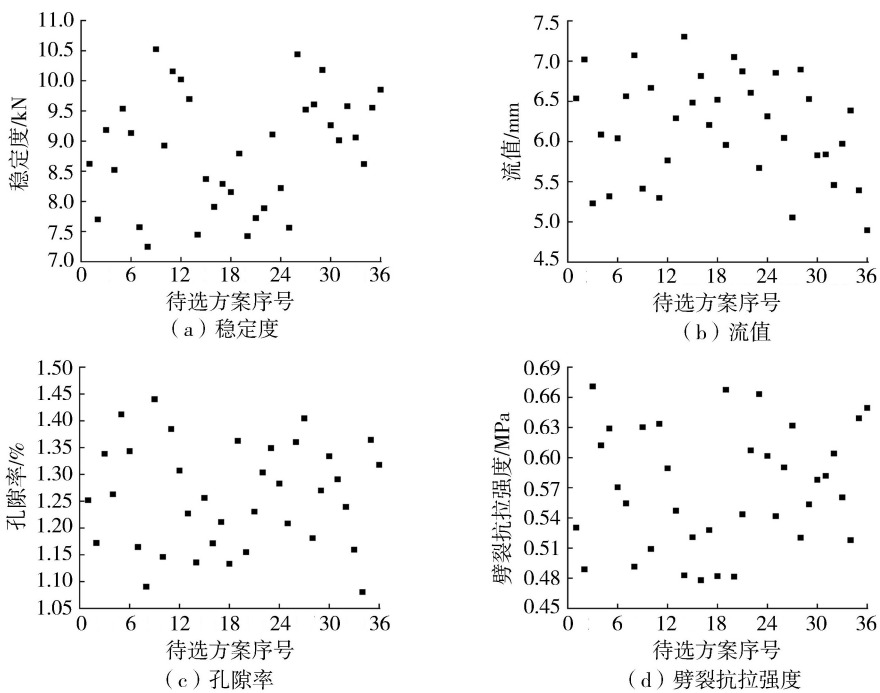


图3 待选方案评价指标

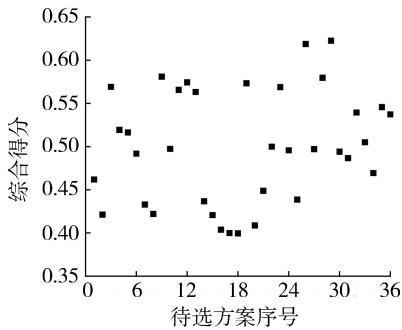


图4 待选方案综合得分

处于中上水平,但孔隙率最大,流值处于低水平;方案3劈裂抗拉强度最优,但稳定性和流值均小于方案9;方案34孔隙率最优,而其他指标均劣于方案15;方案14流值最优,而其他指标均劣于方案34。由此可得,追求单一指标最优并不能保证其他指标处于较优水平,甚至会使其处于低水平,因此,配合比优选时应考虑所有指标的综合效益。根据图4结果,选择得分最高的29号方案为本文最优配合比方案,该方案级配指数为0.42,填料用量为11%,沥青用量为6.9%,所对应的稳定性、流值、孔隙率、劈裂抗拉强度指标理论值分别为10.08 kN、6.53 mm、1.27%和0.553 MPa。经试验验证,该配合比方案的稳定性、流值、劈裂抗拉强度、孔隙率分别为10.22 kN、6.33 mm、0.549 MPa和1.25%。试验结果与理论计算结果相比,误差均在3.5%以内。

为验证本文方法的先进性,采用传统正交试验设计方法进行配合比的优选,通过对表1前12个试验方案进行极差、方差分析,确定7号配合比为最优

配合比,该配合比的稳定性、流值、孔隙率、劈裂抗拉强度分别为9.69 kN、6.35 mm、1.23%和0.542 MPa。对比分析本文方法和传统方法的优选结果可得,本文方法优选出的配合比所对应的沥青混凝土性能总体上要优于传统方法,这主要是因为本文方法实现了全因素水平组合配合比方案的评价指标的精确预测和以综合效益为目标的配合比方案的全局寻优。此外,相比传统方法,本文方法将配合比优选多目标决策问题转化为综合性能最优的单目标寻优问题,实现了对各配合比方案的客观评价,避免了优选结果受决策者经验水平影响而存在差异的问题。

### 3.2 配合比验证

根据优选出的配合比配制沥青混凝土,并按DL/T 5362—2018《水工沥青混凝土试验规程》规定的试验方法测定其性能,得出其孔隙率为1.25%、渗透系数为 $6.93 \times 10^{-9}$ 、水稳定系数为0.95、抗弯强度为2130 kPa、弯拉应变为2.669%、黏聚力为405 kPa、内摩擦角为 $30.1^\circ$ ,均满足SL 501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》要求,表明该配合比可应用于工程建设中。

## 4 讨论

现有的配合比设计方法针对单一评价指标的方案寻优有显著优势<sup>[3-6]</sup>,而实际工程中多为多评价指标的配合比方案优选,上述方法优选过程需要人为干预且依赖于决策者对配合比设计的经验水平,可能导致优选结果偏离理想解。本文采用PPR建模技术建立了沥青混凝土评价指标计算模型,并与基

于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合对全因素水平组合的配合比方案中的评价指标的综合效益进行了定量评价,由此得到的配合比方案更加客观、合理。将 PPR 建模技术应用于沥青混凝土配合比设计中,与传统设计方法相比试验量相对较小,且实现了不同配合比方案评价指标的精确预测,可用于探究各因素与评价指标的变化规律及对评价指标值进行针对性的调控。采用 TOPSIS 评价法并借助熵权将配合比优选多目标决策问题转化为综合性能最优的单目标寻优问题,解决了优选结果受限于决策者经验水平而存在差异的问题。依据本文评价结果并结合相关文献<sup>[5,12-13]</sup>可知,以综合效益为目标进行配合比方案的优选不管从客观理论计算还是人为主观判断都是可行且契合实际的。但本文提出的方法(PPR-TOPSIS 分析法)目前仅适用于碾压式沥青混凝土心墙的配合比优选,针对浇筑式沥青混凝土心墙,尚需考虑分离度及施工黏度指标,并进一步验证方法的合理性。

此外,室内试验设计的配合比在实际工程中能充分发挥作用的前提是保证施工过程中配合比组成成分及比例的一致性。而实际心墙工程的施工,相比室内试验无论是称量方面还是立模成型方面精细度都有较大的偏差,导致施工现场与室内试验的沥青混凝土的指标值存在差异,可能出现较大的劣化。因此,在未来研究中,建议采用数理统计手段对多个心墙工程钻取的芯样组成成分的偏差情况进行统计分析,并以此为依据在配合比优选时将待选配合比方案和与之对应的带有偏差的配合比视为一组,进行配合比方案组的优选,由此得到的方案综合考虑了室内试验与施工应用的情况,更贴近实际情况。

## 5 结 论

a. 提出了 PPR 建模技术与基于熵权的 TOPSIS 综合评价法相结合的沥青混凝土配合比优选方法。与传统配合比设计方法相比,PPR-TOPSIS 分析法减少了人为主观因素影响,实现了全因素水平组合的方案寻优和以综合效益为目标的配合比方案的定量评价,优选的方案更为合理,可为设计人员提供决策支持。

b. 采用 PPR 建模技术,在正交试验设计的基础上,建立沥青混凝土配合比设计参数与各评价指标的 PPR 计算模型,所得模型具有较高的计算精度,以 5% 相对误差为标准,检验合格率为 93.1%,平均相对误差为 2.01%,能够对试验范围内配合比方案的评价指标进行精确预测,为沥青混凝土性能指标的调控提供了有效的技术手段。

c. 将 PPR-TOPSIS 分析法应用于新疆乔拉布拉水库心墙工程的沥青混凝土配合比方案优选中,通过仿真计算、对比评价,最终确定出最优配合比方案:级配指数 0.42,填料用量 11%,沥青用量 6.9%,经力学性能检验该方案的试验结果满足规范要求,可用于工程建设中。

## 参考文献:

- [1] 李江,柳莹,何建新. 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J]. 水利水电科技进展,2019,39(1):82-89. (LI Jiang, LIU Ying, HE Jianxin. Advances in construction technologies of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1):82-89. (in Chinese))
- [2] 党发宁,高俊,任劼,等. 200m 级超高沥青混凝土心墙堆石坝的受力可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3690-3700. (DANG Fanning, GAO Jun, REN Jie, et al. Research on mechanical feasibility of 200m ultra-high asphalt concrete core rockfill dams [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup2):3690-3700. (in Chinese))
- [3] 伦聚斌,何建新,王怀义. 粗骨料超径率对心墙沥青混凝土力学性能的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):169-173. (LUN Jubin, HE Jianxin, WANG Huaiyi. The effects of oversized coarse aggregate rate on mechanical properties of asphalt concrete core wall [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(1):169-173. (in Chinese))
- [4] 全卫超,何建新,王怀义. 砾石骨料破碎对心墙沥青混凝土的性能影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):175-179. (TONG Weichao, HE Jianxin, WANG Huaiyi. Analysis of influence of gravel aggregate broken on performance of asphalt concrete core wall [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(1):175-179. (in Chinese))
- [5] 张应波,王为标,兰晓,等. 土石坝沥青混凝土心墙酸性砂砾石料的适用性研究[J]. 水利学报,2012,43(4):460-466. (ZHANG Yingbo, WANG Weibiao, LAN Xiao, et al. Research on the suitability of acidic gravels for asphalt core of embankment dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4):460-466. (in Chinese))
- [6] 余华英,韩守都. 配合比参数对水工沥青混凝土防渗性能影响的试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(5):145-148. (YU Huaying, HAN Shoudu. Experiment on the influence of parameters of mix proportion on the anti-seepage of hydraulic asphaltic concrete [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(5):145-148. (in Chinese))
- [7] 郑祖国,何建新,宫经伟,等. 复杂系统的投影寻踪回归

- 无假定建模技术及应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2019:82-102.
- [8] 闫林,何建新,杨海华. 富胶凝砂砾石材料抗压及抗冻性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(1):197-202. (YAN Lin, HE Jianxin, YANG Haihua. Research on the anti-compression and anti-freeze properties of the cemented sand and gravel material[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(1): 197-202. (in Chinese))
- [9] 姜春萌,宫经伟,唐新军,等. 基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. 建筑材料学报,2019,22(3):333-340. (JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese))
- [10] GONG J W, JIANG C M, TANG X J, et al. Optimization of mixture proportions in ternary low-heat Portland cement-based cementitious systems with mortar blends based on projection pursuit regression [J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117666.
- [11] 宫经伟,陈瑞,曹国举,等. 基于PPR无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J]. 建筑材料学报,2020,23(4):948-954. (GONG Jingwei, CHEN Rui, CAO Guoju, et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 948-954. (in Chinese))
- [12] 王晓奇. 水工沥青混凝土配合比的优化及施工质量控制研究[D]. 西安:西安理工大学,2017:31-38.
- [13] 张伟,黄斌,张本蛟. 水工室温沥青混凝土工程特性试验研究[J]. 水利学报,2015,46(增刊1):27-33. (ZHANG Wei, HUANG Bin, ZHANG Benjiao. Experimental study on engineering characteristics of hydraulic room-temperature asphalt concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(Sup1): 27-33. (in Chinese))
- [14] 何建新. 碾压式沥青混凝土心墙坝新技术研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2020:126-131.
- [15] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 8-14. (in Chinese))
- [16] 丁朴荣. 水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M]. 北京:水利电力出版社,1990:152-161.
- [17] 鲁春阳,文枫,杨庆媛,等. 基于改进TOPSIS法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断:以重庆市为例[J]. 资源科学,2011,33(3):535-541. (LU Chunyang, WENG Feng, YANG Qiangyuan, et al. An evaluation of urban land use performance based on the improved TOPSIS method and diagnosis of its obstacle indicators: a case study of Chongqing [J]. Resources Science, 2011, 33(3): 535-541. (in Chinese))
- [18] 李灿,张凤荣,朱泰峰,等. 基于熵权TOPSIS模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):217-227. (LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese))

(收稿日期:2022-04-23 编辑:骆超)

(上接第62页)

- [10] 高素坤,齐磊,吕明亮,等. 太阳能微动力组合式一体化污水处理设备在农村地区的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(5):678-684. (GAO Sukun, QI Lei, LYU Mingliang, et al. Application of solar micro power modular integrated sewage water treatment equipment in rural areas [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 48(5): 678-684. (in Chinese))
- [11] 严伊竣,王春艳,刘毅,等. 社区化粪池污水能量转化估算与分析研究[J]. 中国环境科学,2023,43(1):143-152. (YAN Yijun, WANG Chunyan, LIU Yi, et al. Estimation and analysis of embodied energy conversion in community septic tank [J]. China Environmental Science, 2023, 43(1): 143-152. (in Chinese))
- [12] 黄川,王里奥,宋珍霞,等. 有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究[J]. 环境工程学报,2010,4(7):1636-1642. (HUANG Chuan, WANG Li'ao, SONG Zhenxia, et al. Study on septic tank nightsoil sludge reduction by bioaugmentation of EM and MCMP [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1636-1642. (in Chinese))
- [13] 张宇航,沈玉君,王惠惠,等. 农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(2):230-238. (ZHANG Yuhang, SHEN Yujun, WANG Huihui, et al. A study on the harmless treatment technology of night soil in rural toilets [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 230-238. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-02 编辑:俞云利)

# 混凝土防渗面板裂缝综合无损检测技术研究

邹晨阳<sup>1,2,3</sup>, 张双喜<sup>1</sup>, 陈芳<sup>2,3</sup>

(1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029;  
3. 江西省水工安全技术研究中心, 江西 南昌 330029)

**摘要:**针对某面板堆石坝混凝土防渗面板表面裂缝, 采用地质雷达法、冲击回波法和超声波平测法等无损手段进行检测, 分析了不同裂缝的电磁波场响应特征, 评估了冲击回波法和超声平测法对不同裂缝的检测效果及影响因素, 并进行了误差分析; 对比钻孔取芯结果, 探讨了基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合无损检测方法在裂缝检测中的有效性和精准度。研究结果表明: 地质雷达法直观高效, 可实现对防渗面板裂缝的整体检测, 快速识别裂缝分布及物性形态; 冲击回波法和超声波平测法以其准确灵活的优势, 可进一步判定裂缝的深度; 通过合理组合检测方法、科学布设测线, 综合无损检测方法可查明目标区域裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸, 提升裂缝检测的全面性、准确性及精准度。

**关键词:**混凝土防渗面板; 裂缝; 无损检测; 地质雷达; 冲击回波法; 超声波平测法

中图分类号: TV698.1<sup>+</sup>4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)02-0089-07

**Study on integrated non-destructive inspection technology for impervious concrete panel cracks//ZOU Chenyang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shuangxi<sup>1</sup>, CHEN Fang<sup>2,3</sup>** (1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 3. Jiangxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** Surface cracks in the impervious concrete panel of a concrete faced rockfill dam were examined by employing several non-destructive testing methods, including ground penetrating radar, impact echo and ultrasonic plane inspection. The characteristics of electromagnetic response of different types of cracks were analyzed, the effects and influencing factors of impact echo and ultrasonic plane measurement upon different cracks were assessed with error analysis. By comparing with direct drilling results, the effectiveness and accuracy of integrated non-destructive method, which was established by incorporating holistic rapid inspecting and local accurate measurement, were discussed in crack detection. The results indicate that ground penetrating radar, with its intuitive and high efficiency, can achieve an overall investigation of impervious panel cracks, and quickly identify their distribution and physical properties. The impact echo and ultrasonic plane measuring method, with their accuracy and flexibility, can further determine the crack depth. Through reasonably combining testing methods and scientifically laying out survey lines, the proposed methods can identify the distribution, basic properties, scope and size of cracks, whilst improving the comprehensiveness, accuracy and precision of detection.

**Key words:** impervious concrete panel; crack; non-destructive testing; ground penetrating radar; impact echo; ultrasonic plane measurement

面板堆石坝以其安全、经济、环保等优势, 成为当前水利建设中应用最为广泛的坝型之一。钢筋混凝土面板作为该类型坝体的主要防渗结构, 是大坝安全运行的重要保障<sup>[1]</sup>。完整密实的混凝土面板能有效防止水流渗入, 但由于设计缺陷、施工质量问题、长期荷载效应、坝基坝体变形、环境侵蚀等因素的叠加作用, 防渗面板很容易产生裂缝<sup>[2]</sup>, 不仅影响抗渗性能, 甚至可能损害主坝体的承载能力和耐

久性, 危及大坝安全。国际大坝协会调查了众多大坝失事原因, 结果表明超过 10% 的大坝是由于混凝土裂缝扩展问题所导致的<sup>[3]</sup>。因此, 作为面板堆石坝安全鉴定与评价中的关键一环, 混凝土防渗面板的裂缝检测的重要性不言而喻, 快速准确全面地获取裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸, 就可以分析评估裂缝对结构安全的影响, 并为后续的修复加固提供科学依据。

**基金项目:**国家自然科学基金(41874169); 江西省重点研发计划(20203BBGL73234); 江西省水利厅科技项目(202022YBKT08, 202123YBKT23)

**作者简介:**邹晨阳(1990—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水利工程无损检测研究。E-mail: chenyanzou@whu.edu.cn

现有的裂缝检测方法众多,优缺点和适用性各有不同,难以在复杂水工环境下实现裂缝的全面、准确、有效检测。传统的检测方法,如钻芯直接测量和钻孔电视法,优点是直观准确,缺点是检测范围有限,代表性不强且费时费力,同时对实体结构具有破坏作用。近年来,基于弹性波、电磁波等原理的无损检测技术以其便捷精准、快速高效的特点,在混凝土质量检测领域受到广泛关注。田晖等<sup>[4]</sup>通过裂缝物理模型试验,证明了超声平测法(ultrasonic plane measurement, UPM)检测裂缝深度的可靠性,并分析了斜交、非对称布点等对测量结果的影响;刘兆勇等<sup>[5]</sup>研究了混凝土内钢筋对超声横波三维成像检测结果的影响,指出斜向分布的钢筋对缺陷异常的识别干扰较大;罗广衡等<sup>[6]</sup>采用有限元数值模拟定量分析了瑞利波检测混凝土表面裂缝深度的影响因素;刘平等<sup>[7]</sup>比较了超声法和瑞利波法对同一裂缝的测试结果,认为瑞利波法受混凝土内部介质影响小,测量深度更大;卢成明等<sup>[8]</sup>利用地质雷达(ground penetrating radar, GPR)检测道路结构层中的裂缝,并总结了裂缝的实用探测技术;Tarussov等<sup>[9]</sup>提出了一种GPR图像视觉分析方法,以此来判定混凝土中的缺陷赋存及钢筋腐蚀状态;邓安仲等<sup>[10]</sup>指出红外热成像仪能够识别混凝土裂缝位置及走向,从而实现裂缝的大面积、快速分布式监测;Kang等<sup>[11]</sup>用冲击回波法(impact echo, IE)检测混凝土污水管道中的孔洞,对比了由快速傅里叶变换和短时傅里叶变换计算得出的裂缝深度,指出了两种算法各自的优势;Liu等<sup>[12]</sup>基于IE的频谱相位来区分裂缝及钢筋回波,认为裂纹回声的频谱相位接近于0,而钢筋回声相位接近于 $\pi/2$ ;冯少孔等<sup>[13]</sup>采用冲击映像法对混凝土裂缝的平面分布范围及严重程度进行了定性检测,并通过取芯检验和有限元模拟验证了检测结果。

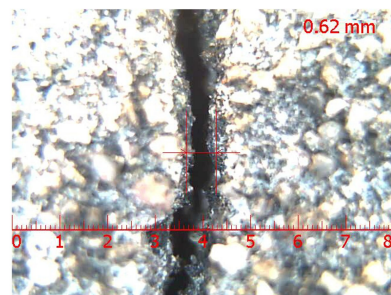
虽然无损检测方法在混凝土缺陷与裂缝的检测上取得了一定进展,但大都只限于单一检测方法的应用,成果也局限于裂缝与缺陷的定性判断或仅是单一指标的定量判定,缺少对混凝土裂缝全面检测的研究。实际上,水工混凝土受限于裂缝发育面难检测、裂缝深度范围难预估、内部复杂介质及环境干扰等多因素影响,采用单一方法检测裂缝很有可能形成多解,难以做出全面准确的判定。本文针对江西省某面板堆石坝混凝土防渗面板裂缝,采用基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合无损检测方法进行检测,并结合钻孔取芯进行观察验证,以提高裂缝检测的准确性和精准度。

## 1 研究区概况

某水库控制流域面积为 $58.7 \text{ km}^2$ ,正常蓄水位为 $443.00 \text{ m}$ ,总库容为 $1041 \text{ 万 m}^3$ ,是一座以供水为主,兼有防洪、发电等综合效益的中型水库。大坝由钢筋混凝土面板堆石坝和混凝土重力坝两部分构成,堆石坝采用弱至微风化的千枚岩填筑,坝顶最大坝高 $78.5 \text{ m}$ ,坝轴线长 $244.16 \text{ m}$ ,从左岸向上游偏转后通过重力坝与山头相接。防渗面板(图1(a))设计厚度为 $50 \text{ cm}$ ,采用C25混凝土浇筑,内部配有双层双向钢筋。由于堆石坝迎水面的混凝土防渗面板常年带缝(图1(b))运行并存在渗水问题,给整个坝体的安全带来隐患。为查明裂缝发育情况,开展了裂缝检测工作,检测内容主要包括裂缝的位置分布、形态规模和具体尺寸等。



(a) 混凝土防渗面板



(b) 面板表面裂缝

图1 主坝防渗面板和典型表面裂缝

经前期表观调查,混凝土防渗面板裂缝大部分为走向平行于大坝轴线的横向裂缝,少部分为纵向裂缝。检测查明主坝左2号防渗面板有表面横向裂缝3条,分别编号为L2-1、L2-2和L2-3。其中L2-1号裂缝位于面板偏上部,长度约为 $1.6 \text{ m}$ ,宽度为 $1.0 \sim 1.6 \text{ mm}$ ;L2-2号裂缝位于面板中部,长度约为 $0.7 \text{ m}$ ,宽度为 $0.5 \sim 2.6 \text{ mm}$ ;L2-3号裂缝位于面板中部偏下,长度约为 $2.1 \text{ m}$ ,宽度为 $0.8 \sim 3.1 \text{ mm}$ 。

## 2 检测方法及测线布置

### 2.1 GPR

GPR向混凝土内部发射宽频带脉冲电磁波,电磁波在传播过程中遇到存在电性参数(介电常数和电导率等)差异的目标介质,如层内分界面、不规则

缺陷或裂缝等,电磁波反射上行,被接收天线接收。通过分析接收到的反射电磁波的双程走时、振幅、波形和频率等参数,推断混凝土内部目标体的几何形态、位置分布、物性结构及电性特征等,从而达到探测内部隐蔽物的目的<sup>[14]</sup>。

现场检测使用1500 MHz屏蔽天线,采集仪器为GSSI的SIR-3000主机,采用自激自收模式,天线垂直于裂缝轴线方向移动,沿面板中轴线从上而下进行探测(图2)。经现场初步探测试验对比,测线记录点距设置为0.05 m,记录时窗取10 ns时,可保证防渗面板内数据采集的完整性并提高裂缝在雷达剖面上的辨识度。每道扫描采样点数为1 024个,以保证采样数据准确可靠。后期采用Reflexw软件处理雷达数据,经过直达波去除、零时校正、背景去除、滤波、静校正、增益等步骤对原始信号进行处理。

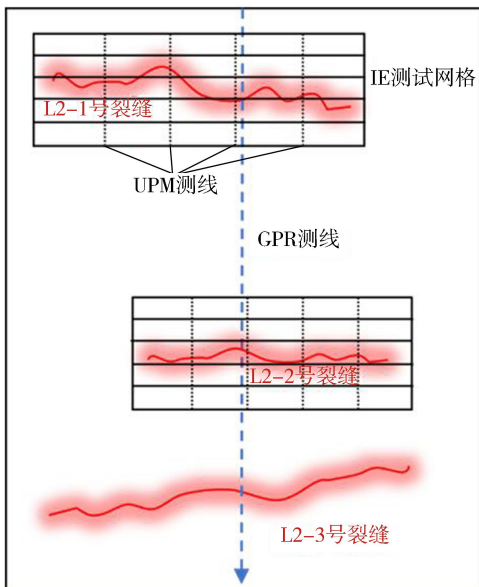


图2 主坝左2号防渗面板总体测线布置示意图

## 2.2 IE

IE利用小钢球在结构表面施加微小弹性脉冲,因脉冲波阻抗差异,脉冲波在混凝土各界面和裂缝与缺陷处发生多次反射,形成瞬态共振,使时域位移信号具有周期性特征。通过快速傅里叶变换将时域波形转换为频谱曲线,其中峰值频率代表了混凝土内部裂缝与缺陷的深度或混凝土结构层的厚度<sup>[15]</sup>,可通过下式计算:

$$H = \frac{\lambda v_p}{2f} \quad (1)$$

式中: $H$ 为裂缝与缺陷深度或混凝土结构层厚度,mm; $v_p$ 为厚度已知的混凝土结构层的波速测试值,m/s; $f$ 为裂缝与缺陷深度或混凝土结构层厚度的表征频率,kHz; $\lambda$ 为混凝土结构层的几何参数,通常取0.96~0.98<sup>[16]</sup>。需要注意的是,IE检测的为裂缝的

垂向深度,与裂缝倾斜或弯曲无关。

现场检测采用湖南芯仪SET-PI2-01冲击回波仪。测量前,将混凝土表面毛刺清除使表面平整,保证探头耦合紧密。如图2所示,加密布置测试网格,分别沿平行及垂直于裂缝走向方向每50 mm设置一条测线,测线与测线之间的交点即为测点。传感器在距震源50 mm的位置接收信号,由信号采集系统采集时域信号。为了能更准确地获取裂缝深度,每个测点测量3次并分别计算测试深度,去掉其中离差较大的值,取平均值代表裂缝深度。一个测点测试完成后,平移至下个测点重复以上步骤,直到整个网格测试完成。

## 2.3 UPM

UPM将发射换能器和接收换能器置于裂缝两侧,根据惠更斯-菲涅尔原理及克西霍夫绕射积分理论,超声波遇到不连续间断点(裂缝尖端)时将发生绕射,然后上行返回表面被接收<sup>[4,7]</sup>。通过对不同测距条件下超声波绕过裂缝底端传播的初至时间进行测量并比较波形相位的变化,按下式计算裂缝的深度:

$$h_{ci} = \frac{l_i}{2} \sqrt{\left(\frac{t_i v}{l_i}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

式中: $h_{ci}$ 为第*i*点的裂缝深度计算值,mm; $l_i$ 为第*i*点的超声波实际传播距离,mm; $v$ 为不跨缝平整混凝土测试声速,m/s; $t_i$ 为第*i*点声时, $\mu$ s。式(2)适用于垂直裂缝深度的计算,即裂缝与混凝土表面垂直。测量倾斜裂缝的倾角及斜长时,可采用三角形定位法<sup>[17]</sup>、双椭圆定位法<sup>[18]</sup>或者三角余弦方程法<sup>[19]</sup>。

现场检测采用海创高科HC-F800混凝土裂缝缺陷综合测试仪,从IE测试网格中选取4条测线进行UPM检测(图2),方便对两种方法的检测结果进行对比分析。开始检测前需对超声波探头进行标定以及零时校正。测试时设置发射电压为125 V,信号采样点数为1 024个,以保证超声波信号稳定,所采集到的初至波形清晰可辨。每个点的裂缝深度数据至少进行2次重复测量,以减小误差。

## 3 结果与讨论

### 3.1 GPR 检测结果

图3为主坝左2号防渗面板的GPR探测剖面。从图3可以明显看出电磁波在遇到面板内部钢筋后产生的反射、绕射以及相互之间的叠加和干涉现象,每根钢筋都出现了明显的双曲线波形特征,双曲线的顶点则与钢筋的实际位置相对应。

从图3还可以较为清晰地看到,横坐标5.6 m、21.0 m及24.2 m附近出现了较为明显的裂缝回波

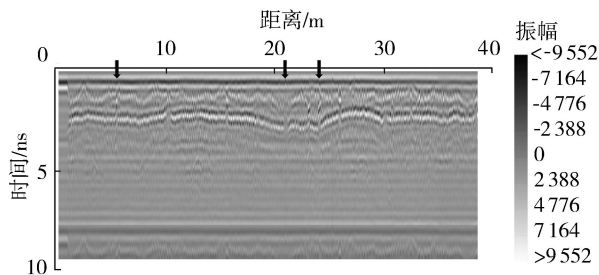


图3 主坝左2号防渗面板GPR探测剖面

信号(从左到右分别对应L2-1、L2-2、L2-3号裂缝),均为垂直裂缝。将从GPR剖面中判断出来的3条裂缝位置与前期表观调查记录的实际裂缝位置进行对比,二者基本一致。在裂缝发育区域,电磁波同相轴出现了明显错断,振幅减小,与同一深度的邻近波形相比,裂缝区域的雷达波形相位发生反转。裂缝顶端出现双曲线散射波形,且随着裂缝宽度变大散射信号随之增强,双曲线的离心率亦增大。双曲线顶点对应裂缝顶端的水平位置,两翼左右对称。由于电磁波在介质中的传播损耗、混凝土粗细骨料的散射、绕射波的叠加干扰以及背景噪声等因素影响,3条裂缝的底端反射电磁波信号均很弱,很难识别。

L2-1号和L2-3号裂缝都为空气充填,雷达剖面上除记录到来自裂缝顶端的散射双曲线回波外,还记录到了由裂缝内部不均匀颗粒物质所引起的能量较强的散射波。这是由于空气对电磁信号传播能量造成的衰减小,且空气与混凝土内部介质的分界面对GPR信号的反射和散射均较强,使得干燥裂缝在雷达剖面上表现为如图3所示的强烈高频多次波。L2-2号裂缝中较为湿润,缝内含较多泥土等填充物,由于黏性土对高频电磁波的强吸收作用,电磁波能量衰减较快,使得含水或充填物的裂缝在雷达剖面上表现为如图3所示的低频振动及同相轴错断扭曲现象。

检测结果表明,采用GPR能够调查混凝土防渗面板中裂缝分布及基本物性形态,但由于裂缝底端回波信号不明,无法从检测剖面判断裂缝向下延伸的具体深度,需要采用其他局部精细检测方法如IE和UPM做进一步详查。

## 3.2 IE检测成果

### 3.2.1 现场波速标定

在采用IE检测裂缝前先需进行混凝土内部弹性波(P波)传播波速的标定。在待检测防渗面板裂缝旁选取密实无缺陷的混凝土区域布置测线,共选取10个测点,相邻测点间距20~40cm,冲击震源和信号接收点的偏移距设为5cm,对接收到的时域回波信号进行快速傅里叶变换,得出这10个测点的峰值频率,这些频率代表了面板底部的特征频率。已知防渗面板厚度为50cm,反算出每一测点对应的波

速如表1所示。

表1 弹性P波在混凝土中不同位置的传播速度

测点编号	板厚频率/kHz	测试波速/( $m \cdot s^{-1}$ )	测点编号	板厚频率/kHz	测试波速/( $m \cdot s^{-1}$ )
1	3.833	3911	6	3.88	3959
2	3.867	3946	7	3.884	3963
3	3.909	3989	8	3.861	3940
4	3.872	3951	9	3.88	3959
5	3.874	3953	10	3.881	3960

剔除表1中离差较大的波速值,取其余波速的平均值作为基准波速。从表1可以看出,测点1、3的波速值较其余测点偏差较大,取另外8个波速的平均值3953m/s为基准波速。

### 3.2.2 结果分析

根据GPR探测结果,L2-1号和L2-3号裂缝都为空气充填,L2-2号裂缝中充填了较多水分、泥土等杂物。因此重点对L2-1号和L2-2号裂缝进行IE检测,分析对比裂缝充填物等对该方法检测精度的影响。

#### 3.2.2.1 L2-1号裂缝

按图2所示布置IE测点,沿垂直于裂缝走向方向布置31条测线,每条测线上布置17个测点,所有527个测点组成一个测试网格将L2-1号裂缝包裹其中,并使其居于网格中部。全部网格数据测试完成后,得到L2-1号裂缝及其附近区域的IE检测结果如图4所示。

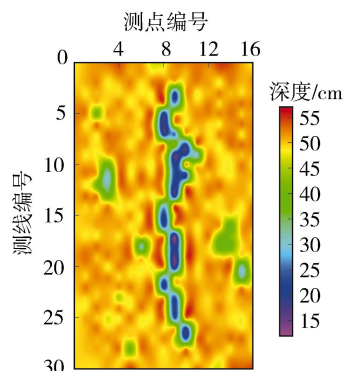


图4 L2-1号裂缝IE检测结果

从图4可以看出:在防渗面板密实无缺陷区域,冲击回波反射位置连续且检测深度基本一致,都是面板的总厚度。检测结果表明,测试板厚在47.78~53.45cm之间,平均值为50.2cm。以此作为背景值,计算深度低于背景值的10%以上的定义为异常区域。可以看出在横坐标7~10、纵坐标2~28附近,一组异常带的深度值明显低于背景值,在14.52~30.81cm之间,平均深度为21.6cm,可以判定该异常区域即是裂缝发育区。此外,在坐标(2,5)、(3,12)、(7,18)及(14,17)等几处附近,异常带的检测深度稍低于背景值,为31.43~47.36cm,推断这几



处混凝土内部可能存在脱空、孔洞或节理裂隙发育,存在质量缺陷。

提取部分代表性测点的时域波形数据,通过快速傅里叶变换得到频谱曲线如图 5 所示,可以看出在密实无缺陷区域(测点(2,2)),频谱曲线上只有一个明显峰值频率,为板厚频率。当混凝土内部存在孔隙或裂缝等缺陷时(测点(3,12)和(8,6)),对应测点的频谱图上出现不同的频率峰值,据此可进一步证明该区域的混凝土面板出现不密实情况,而其中最大的峰值频率表征了缺陷或裂缝的特征频率,代入式(1)可计算对应的缺陷或裂缝的深度。

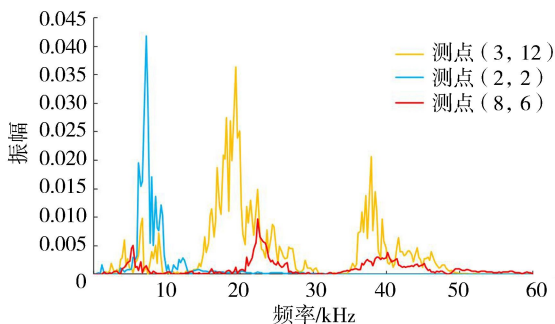


图 5 不同测点典型频谱曲线

由于混凝土内部不均匀(小孔隙或欠密实等),应力 P 波的散射干扰增加,加大了频谱图像的复杂性。随着传播路径增长,不密实区域也会造成 P 波传播能量衰减,波速较正常区域偏低,板厚频率向左发生偏移。此外,由缺陷引起的反射波比例降低,底部及其他边界引起的干扰反射波比例增加,使得回波响应的频谱成分更加复杂。

### 3.2.2.2 L2-2 号裂缝

沿垂直于裂缝走向方向共布置了 15 条测线,每条测线上共布置 9 个测点,共 135 个测点组成一个测试网格将 L2-2 号裂缝包裹其中,并使其居于网格中部。

图 6 为 L2-2 号裂缝及其附近区域的 IE 检测结果,可以看出,该裂缝周围附近的混凝土整体较密实,无明显缺陷存在,因此检测到的厚度较为连续,高度基本一致。测试面板厚度在 48.12 ~ 55.75 cm 之间,平均值为 52.3 cm。在网格中部横坐标 4 ~ 5、纵坐标 3 ~ 12 附近出现一组异常带,深度值明显偏低,检测深度为 23.51 ~ 36.46 cm,平均深度为 31.1 cm,为裂缝发育区。

以上结果表明,IE 检测结果不仅是对 GPR 检测结果的进一步检验,能准确识别出垂直裂缝的具体深度,还是对 GPR 的补充:受限于面板内浅层钢筋对高频电磁波传播的干扰影响,GPR 较难辨别混凝土内部钢筋下方的小孔隙或不密实等缺陷,而 IE 利用的是低频的应力 P 波,其能量高、频谱响应性

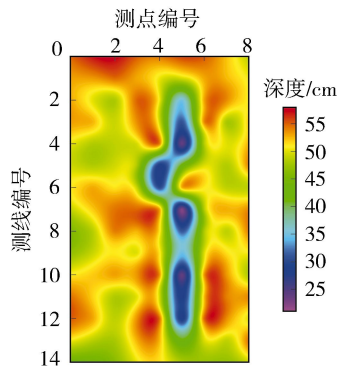


图 6 L2-2 号裂缝 IE 检测结果

能好,测试深度大,受钢筋、水分等的影响较小,适用于准确圈定缺陷位置分布等。但是作为一种局部检测方法,IE 测试时需布置很多测点组成测试网格,采集效率相对偏低。在实际工作中应根据现场情况选取合适的检测方法。

## 3.3 UPM 检测成果

### 3.3.1 现场波速标定

现场超声波速标定时,将发射和接收换能器放置于裂缝同一侧的混凝土密实区域,当两个换能器测距  $l$  分别为 50 mm、100 mm、150 mm 和 200 mm 时读取首波声时  $t$ ,绘制成超声波在混凝土中传播的时距曲线如图 7 所示,经回归分析得到测距  $l$  与声时  $t$  之间的回归直线方程为

$$l = 3.2705t - 8.6007 \quad (3)$$

则不跨缝平测所得的超声波速为 3.2705 km/s。

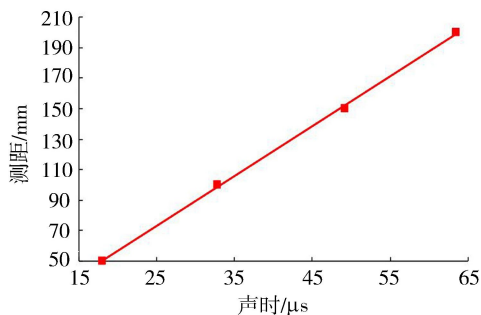


图 7 不跨缝平测超声波时距曲线

### 3.3.2 结果分析

按 CECS21:2000《超声法检测混凝土缺陷技术规程》进行测距修正后,对 L2-1 号和 L2-2 号裂缝分别进行 UPM 测量,所得裂缝深度检测结果见表 2,表中同时给出了同一测点的 IE 检测结果。为验证 UPM 和 IE 检测结果,现场对 2 条裂缝测试部位进行钻孔取芯,发现 L2-1 号裂缝在混凝土中延展较明显,基本呈闭合状态,内部干燥无杂质,芯样未裂开,实测裂缝深度为 15.24 cm 和 29.73 cm。L2-2 号裂缝宽度稍大,内部可见湿润黏土填充,芯样开裂,实测裂缝深度为 24.65 cm。

表 2 裂缝深度检测结果

裂缝	测线 编号	检测 位置	裂缝深度检测值/cm			与实际偏差/%	
			UPM	IE	钻孔取芯测量	UPM	IE
L2-1	1	(10, 27)	14.18	14.70	15.24	6.96	3.54
	2	(8, 22)	21.98	22.68			
	3	(8, 15)	26.89	28.44	29.73	9.55	4.34
	4	(9, 3)	17.50	17.10			
L2-2	1	(5, 4)	11.25	23.51			
	2	(4, 6)	15.52	25.88	24.65	37.04	4.99
	3	(5, 9)	19.87	30.69			
	4	(5, 10)	20.47	25.11			

由表 2 可知,因为 L2-1 号裂缝内部干燥,UPM 与 IE 检测结果接近,两者的绝对误差值在 0.40 ~ 1.55 cm 之间,相对误差在 2.34% ~ 5.45% 之间。与钻孔取芯测量的实际裂缝深度相比,两种方法的测量结果基本吻合。UPM 检测结果与实际值的绝对误差在 1.06 ~ 2.84 cm 之间,相对误差为 6.96% ~ 9.55%。IE 检测结果与实际值的绝对误差在 0.54 ~ 1.29 cm 之间,相对误差为 3.54% ~ 4.34%,两种方法的测量误差均在工程要求范围之内。但 UPM 的测量精度稍逊于 IE,且随着裂缝深度增加,其测量误差有随之增大的趋势。究其原因,超声波信号频率相对较高,传播衰减快,加上受面板内密集钢筋影响,超声波产生反射、散射及折射等现象,超声 P 波的速度亦随之发生变化,导致测量结果受到干扰。而脉冲波频率相对更低,但其能量更高,衰减较慢,受钢筋等的影响较小。如孔楠楠等<sup>[20]</sup>研究表明,混凝土中直径不超过 25 mm 的钢筋,对脉冲波速无太大影响。

L2-2 号裂缝内部被湿润黏土等杂物充填,UPM 与 IE 检测结果相差较大,两者的绝对误差值在 4.64 ~ 12.26 cm 之间,相对误差在 18.48% ~ 52.15% 之间。与钻孔取芯测量的实际裂缝深度相比,IE 检测结果与实际值较为接近,二者绝对误差仅 1.23 cm,相对误差为 4.99%。而 UPM 检测结果与实际值相差较大,绝对误差达 9.13 cm,相对误差为 37.04%。究其原因,裂缝中水分、泥土等充填物干扰了超声波传播,使超声波速减小,振幅减弱,能量衰减。而且 UPM 测量裂缝是建立在超声 P 波信号能绕过裂缝底端的基础上,充填物的存在使得超声 P 波并未能绕过裂缝底端,而是通过水分或者杂质穿过裂缝,直接到达了接收换能器,使首波声时大为减小。这些因素导致 UPM 测量湿润、含泥裂缝的结果偏小。而 IE 检测则基于弹性 P 波在裂缝及外部边界之间多次反射形成谐振,进而在频谱中表征裂缝或边界深度的频率峰值,因此受裂缝中充填物的影响较小,测试精度更高。

### 3.4 讨论

通过 GPR、IE、UPM 并结合钻孔取芯法对坝体防渗面板裂缝进行综合检测,确定了裂缝的形态、位置分布及具体深度:L2-1 号裂缝距面板顶边约 5.6 m,为横向垂直裂缝,长度约为 1.6 m,宽度为 1.0 ~ 1.6 mm,深度为 14.18 ~ 30.81 cm,平均深度为 21.6 cm。L2-2 号裂缝距面板顶边约 21.0 m,亦为横向垂直裂缝,长度约为 0.7 m,宽度为 0.5 ~ 2.6 mm,深度为 23.51 ~ 36.46 cm,平均深度为 31.1 cm。此外,根据 IE 检测结果,还判断部分区域的混凝土内部存在孔洞、不密实等缺陷,导致防渗效果受到破坏。

GPR 具备高效快捷,覆盖范围大等优点。现场检测通过缩小 GPR 采样点距至 5 cm,实现了对防渗面板中裂缝的分布及物性形态等的有效探测。由于检测技术和环境因素干扰,GPR 较难辨别裂缝的延伸深度,需辅以其他精细检测方法详查。IE 和 UPM 均能准确检测干燥空气填充的垂直裂缝深度,且 IE 受钢筋等的影响较小,检测精度比 UPM 稍高,但倾斜裂缝的倾角和延伸长度只能通过 UPM 进行检测。当裂缝中有水分或其他填充物时,UPM 检测结果比实际值偏小很多,而 IE 检测结果与实际值更为接近。但 IE 检测的缺点是需布置很多测点,相较而言工作效率是 3 种方法中最低的,且检测的均是裂缝底部尖端至水平面投影的垂向深度。因此在实际工作中应根据现场情况及方法各自的优缺点进行综合检测。

现场检测结果表明:基于整体快速探测与局部精准测量相结合的综合方法检测混凝土裂缝是可行的,可使用 GPR 进行大范围调查,快速确定裂缝位置分布及形态规模;若裂缝干燥,可使用 UPM 和 IE 对裂缝进一步详查;若裂缝内有水或充填物,建议选择 IE 进行检测。这样在保证准确性和精准度的同时也可提高检测效率。

### 4 结论

- 从 GPR 检测剖面上可识别混凝土防渗面板裂缝的位置分布、基本形态规模及相对宽度等特性,但很难测量到裂缝的具体深度,需要采用其他局部精细检测方法如 IE 和 UPM 做进一步详查。
- IE 受环境因素干扰影响较小,检测裂缝深度的精度较高,而且可以圈定混凝土内部缺陷的位置及分布情况,但相对其他两种方法,其检测效率偏低。
- UPM 受钢筋尤其是裂缝中水分或他填充物影响较大,适用于干燥且深度不大的裂缝的检测。
- 基于 GPR、IE 和 UPM 相结合的裂缝综合无损检测方法,几种方法相互补充、互为印证、对比分析,适用于大坝防渗面板裂缝的多参数多尺度的综

合检测,可满足不同的检测范围及精度要求。必要时结合钻孔取芯等方法进行观察验证,可使裂缝检测的全面性与精准度大为提高,为后期大坝的安全评估和治理加固提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] 吴增文. 堆石坝趾板和面板施工中混凝土工艺及质量评价分析[J]. 地下水, 2018, 40(4): 242-244. (WU Zengwen. Evaluation and analysis of concrete technology and quality of toe slab and face slab in rockfill dam[J]. Ground Water, 2018, 40(4): 242-244. (in Chinese))
- [2] 罗大明, 牛荻涛, 苏丽. 荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 1-14. (LUO Daming, NIU Ditao, SU Li. Research progress on durability of stressed concrete under environmental actions [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 1-14. (in Chinese))
- [3] 姚霄雯, 张秀丽, 傅春江. 混凝土坝溃坝特点及溃坝模式分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 83-86. (YAO Xiaowen, ZHANG Xiuli, FU Chunjiang. Failure characteristic and failure mode analysis for concrete dam [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 83-86. (in Chinese))
- [4] 田晖, 辛纯涛, 张坤. 超声波单面平测法检测混凝土构件裂缝深度可靠性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(6): 133-136. (TIAN Hui, XIN Chuntao, ZHANG Kun. The reliability analysis on single plane detecting of ultrasonic wave for the concrete structures crack depth [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(6): 133-136. (in Chinese))
- [5] 刘兆勇, 张磊, 袁翠祥. 超声横波三维成像技术对混凝土内钢筋反映假异常的辨识[J]. 水运工程, 2021(12): 84-88. (LIU Zhaoyong, ZHANG Lei, YUAN Cuixiang. Identify of reflect false anomaly of steel bar in concrete by ultrasonic S-wave 3D imaging technology[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(12): 84-88. (in Chinese))
- [6] 罗广衡, 潘坚文, 王进廷. 瑞利波法检测混凝土表面裂缝深度的影响因素研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(9): 165-171. (LUO Guangheng, PAN Jianwen, WANG Jinting. Study on influencing factors of detecting surface crack depth with Rayleigh wave detection method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(9): 165-171. (in Chinese))
- [7] 刘平, 关春先, 罗技明, 等. 基于冲击弹性波和超声波的混凝土裂缝深度无损检测技术方法比较[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2018, 31(1): 64-68. (LIU Ping, GUAN Chunxian, LUO Jiming, et al. Comparison of non-destructive testing methods for concrete crack depth based on impact elastic wave and ultrasonic wave [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2018, 31(1): 64-68. (in Chinese))
- [8] 卢成明, 秦臻, 朱海龙, 等. 探地雷达检测公路结构层隐含裂缝实用方法研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(5): 1558-1568. (LU Chengming, QIN Zhen, ZHU Hailong, et al. Practical methods for detection of concealed cracks in highway pavement using ground penetration radar data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1558-1568. (in Chinese))
- [9] TARUSSOV A, VANDR M, DE LA HAZA A. Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 1246-1254.
- [10] 邓安仲, 赵启林, 李胜波, 等. 混凝土裂缝红外热成像分布式监测技术研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 284-288. (DENG Anzhong, ZHAO Qilin, LI Shengbo, et al. Study on distributed monitoring technology of infrared thermal image of concrete crack [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 284-288. (in Chinese))
- [11] KANG J M, SONG S, PARK D, et al. Detection of cavities around concrete sewage pipelines using impact-echo method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 1-11.
- [12] LIU P L, LIN L C, HSU Y Y, et al. Recognition of rebars and cracks based on impact-echo phase analysis [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 1-6.
- [13] 冯少孔, 黄涛, 李海枫. 大型预应力混凝土立墙内裂缝检测与成因浅析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 977-982. (FENG Shaokong, HUANG Tao, LI Haifeng. Detection and cause analysis of internal cracks for large scale 2-directional pre-stressed concrete walls [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 977-982. (in Chinese))
- [14] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] SANSALONE M J. Impact-echo: the complete story [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(6): 777-786.
- [16] 张敬彬. 冲击回波法在预应力混凝土结构无损检测中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [17] 周凯. 超声波混凝土构件检测系统的研究及试验分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [18] 吴慧敏. 结构混凝土现场检测新技术: 混凝土非破损检测[M]. 2版. 长沙: 湖南大学出版社, 1998.
- [19] 晏露超. 混凝土结构裂缝的超声波平测法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [20] 孔楠楠, 杨智, 张今阳. 基于冲击回波理论的混凝土裂缝深度测试试验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(11): 121-124. (KONG Nannan, YANG Zhi, ZHANG Jinyang. Impact-echo theory-based experiment study on testing of concrete crack depth [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(11): 121-124. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-05-16 编辑: 熊水斌)

# 基于混合注意力机制和深度学习的大坝变形预测模型

向镇洋<sup>1,2</sup>, 包腾飞<sup>1,2,3</sup>, 白妍丽<sup>4</sup>, 宋宝钢<sup>1,2</sup>, 王瑞婕<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**为深度挖掘时序数据中前后信息的动态相关性,探究大坝变形的内在影响机理,有效提高模型预测精度,构建了一种基于混合注意力机制与鲸鱼优化算法(WOA)的双向门控循环网络(BiGRU)预测模型。模型利用WOA对BiGRU进行超参数寻优以有效挖掘变形数据在时间维度的深层信息,并引入融合特征注意力(FATT)和时间注意力(TATT)的混合注意力机制计算各影响因子的贡献率,使模型可视化并提高模型捕捉环境因素动态变化的能力。以某高拱坝为例,将该模型预测结果与多种常用模型预测结果进行对比分析,结果表明该模型预测精度显著提升,贡献率计算符合大坝变形研究成果,验证了模型在大坝变形预测中的优越性与合理性。

**关键词:**大坝变形预测;深度学习;混合注意力机制;鲸鱼优化算法

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0096-06

**Dam deformation prediction model based on mixed attention mechanism and deep learning**//XIANG Zhenyang<sup>1,2</sup>, BAO Tengfei<sup>1,2,3</sup>, BAI Yanli<sup>4</sup>, SONG Baogang<sup>1,2</sup>, WANG Ruijie<sup>1,2</sup>(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Gansu Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to deeply mine the dynamic correlation between the front and back information in the time series data, explore the internal influence mechanism of dam deformation, and effectively improve the prediction accuracy of the model, a bidirectional gated recurrent unit (BiGRU) prediction model based on mixed attention mechanism and whale optimization algorithm (WOA) was constructed. WOA was used to optimize the hyperparameters of BiGRU to effectively mine the deep information of deformation data in the time dimension. A mixed attention mechanism that combines factor attention mechanism (FATT) and temporal attention mechanism (TATT) was introduced to calculate the contribution rate of each impact factor, so as to visualize the model and improve the ability to capture the dynamic changes of environmental factors. Taking a high arch dam as an example, the prediction results of this model were compared with those of various commonly used models. The results show that the prediction accuracy of this model is significantly improved, and the calculation of contribution rate is in line with the research results of dam deformation, which verifies the superiority and rationality of the model in dam deformation prediction.

**Key words:** dam deformation prediction; deep learning; mixed attention mechanism; whale optimization algorithm

大坝是我国国民经济发展的重要组成部分,在防洪、发电等领域发挥着巨大作用<sup>[1]</sup>,据统计,我国约有9.8万座大坝正在服役,其中,混凝土坝占我国200 m以上大坝的56%<sup>[2]</sup>。大坝运行期间受到来自内外因素的复杂荷载作用,一旦溃决将产生无法预估的损失,然而,大多数的坝体结构破坏是一个长期

的动态渐进过程,这使得通过原型观测数据构建监控模型成为大坝安全评估的重要方法。作为最直观可靠的监测数据,变形是判断大坝安全的重要依据。因此,利用历史监测数据建立大坝变形预测模型具有重要意义。

目前,大坝变形预测模型主要分为以统计模型

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC1508603);国家自然科学基金重点项目(51739003);浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司科技业项目(B2013)

**作者简介:**向镇洋(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: xiang\_zy@hhu.edu.cn

**通信作者:**包腾飞(1974—),男,教授,博士,主要从事水工结构及岩土工程安全监控研究。E-mail: baotf@hhu.edu.cn

为代表的常规模型和浅层机器学习模型。多元线性回归 (multivariable linear regression model, MLR) 模型因其结构简单、计算效率高而被广泛应用于实际工程中。例如:Willm 等<sup>[3]</sup>提出了一种静水-季节-时间变形预测模型并得到了广泛应用;Penot 等<sup>[4]</sup>根据实际气温和周期函数的差异对热力效应进行修正,提出了静水-季节-时间-热力模型。随着计算机理论与技术的发展,浅层机器学习逐渐被应用于大坝变形预测的研究中。例如:徐韧等<sup>[5]</sup>建立了基于极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)和高斯过程(Gaussian process, GP)的大坝变形预测模型;胡德秀等<sup>[6]</sup>将稳健估计极限学习机应用于变形监测中,解决了传统模型抗粗差能力弱等问题;Cao 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于极限学习机的变形预测混合模型,成功解决了大坝变形的波动特征,提高了模型的预测能力。浅层机器学习具有强大的自适应学习能力和非线性映射能力,极大地提高了预测模型的精度,然而浅层机器学习模型未考虑大坝变形的渐进性特征,缺乏对时间维度相关性的关注,泛化能力低,模型预测稳定性较差<sup>[8]</sup>。为了改善浅层机器学习模型的局限性,以循环神经网络(recurrent neural network, RNN)和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络为代表的深度学习模型开始得到应用。例如:欧斌等<sup>[9]</sup>提出了基于 LSTM 网络的混凝土坝变形预测模型;Li 等<sup>[10]</sup>结合周期趋势分解法(seasonal and trend decomposition using loess, STL)、极限树和叠加 LSTM 网络进行了变形预测;侯回位等<sup>[11]</sup>利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)以及样本熵(sample entropy, SE)对变形数据进行分解重构,建立了 LSTM 大坝变形预测模型;Shu 等<sup>[12]</sup>基于变分自编码器(variational auto-encoders, VAE)与时间注意力 LSTM 网络建立大坝长期变形预测模型,提高了模型的稳定性和有效性。现有模型极大地提升了变形预测精度,为大坝安全监控理论的发展作出了巨大的贡献,但仍存在诸多局限性:①浅层机器学习模型普遍存在泛化能力低、信息挖掘能力弱的缺陷,RNN 模型存在长期依赖、梯度爆炸问题,而 LSTM 模型结构较复杂,在面对大量时序数据时处理速度较慢;②模型超参数众多且对模型拟合程度、预测能力和计算速度具有较大的影响;③现有深度学习模型仅考虑了历史信息,无法兼顾输入信息前后的共同特征;④现有模型大多为黑箱模型,不具备解释模型中大坝变形与输入特征因子以及时间步之间的具体关联能力,同时也不具备适应外部环境因素动态变化的能力。

针对上述模型的不足,本文提出一种基于混合

注意力机制和鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)的双向门控循环网络(bidirectional gated recurrent unit, BiGRU)大坝变形预测模型(以下简称“本文模型”)。为充分挖掘大坝变形时序数据在时间维度的前后关联性且简化模型结构,将 BiGRU 作为基础模型,采用 WOA 对 BiGRU 模型的超参数进行自动寻优,最后采用结合特征注意力(FATT)和时间注意力(TATT)的混合注意力机制以充分提高模型的可解释性与预测精度。以某混凝土拱坝变形监测数据为例,利用所建立的模型进行预测,并与门控循环网络(gate recurrent unit, GRU)模型、BP 网络模型、MLR 模型进行对比研究,以验证本文所建立的模型的有效性。

## 1 模型构建

### 1.1 BiGRU 模型

水工建筑物原型观测的实测数据实质上是一个复杂的非线性、非平稳的时间序列数据<sup>[13]</sup>,RNN 模型的提出有效解决了浅层机器学习模型无法挖掘时序数据内部关联的缺陷,借助循环模块引入了时序概念。LSTM 模型<sup>[14]</sup>是一种改进的 RNN 模型,由遗忘门、输入门和输出门组成,通过门控函数的引入,有效解决了传统 RNN 模型中普遍存在的长期依赖、梯度爆炸和消失问题,通过长期的研究,其在大坝安全监控上的有效利用和在较长时序数据预测时的良好性能得到了验证。GRU 模型<sup>[15]</sup>与 LSTM 模型具有相似的基础原理和同样出色的使用效果,同样使用门控机制控制输入、记忆等信息,但在结构上将 LSTM 遗忘门和输入门合并为更新门<sup>[16]</sup>,仅包含更新门和重置门两个门,更新门将上一时间步的信息与当前时间步的输入向量整合在当前隐藏状态中,重置门对上一时刻隐藏状态中的信息进行选择遗忘,与 LSTM 相比,具有超参数较少、结构简单、计算速度快等显著优点,被视为 LSTM 模型的改进。

GRU 模型为从前往后单向传输模式,通常用于解决单一状态变量问题,BiGRU 模型<sup>[17]</sup>由传播方向相反的两个 GRU 模型共同组成,输出层数据由两层 GRU 共同决定,适用于解决多因素复杂条件问题。大坝变形受到多种因素及外部环境条件干扰影响,为充分挖掘大坝变形时序数据内的信息,本文采用 BiGRU 模型。

### 1.2 BiGRU 模型的 WOA 优化方法

当用 BiGRU 模型进行大坝变形预测时,其超参数较多且超参数的选择显著影响了模型精度和收敛速度,为避免手动调参带来的精度下降、效率降低等问题,本文采用 WOA 对 BiGRU 模型进行参数寻优。

WOA 是由 Mirjalili 等<sup>[18]</sup>于 2016 年提出的一种模拟座头鲸捕食行为的群体智能优化算法,其主要受到座头鲸种群利用螺旋式上升的泡泡围住猎物的启发<sup>[19]</sup>。本文将鲸鱼个体作为优化策略,鲸鱼位置维数作为模型待优化参数数量,在不断的位置更新下获得模型的最优参数组合,具有操作简单、搜索能力强、能够跳出局部最优、收敛速度快等显著优点。WOA 主要包括包围猎物、捕食行为和搜索行为 3 个流程<sup>[20]</sup>。

### 1.3 混合注意力机制的应用

注意力机制是受到人类大脑注意力机制的启发,当人类观察一个环境场景时,大脑往往将确定诸多重点并着重关注,而减少甚至忽略其他不重要的环境信息<sup>[21]</sup>。Mnih 等<sup>[22]</sup>首次将注意力机制应用于 RNN 中并实现了图像分类,随后其被广泛应用于图像处理、自然语言处理、数据预测等领域。其基本思想是从大量信息中提取有效信息并通过组合函数判断各关键输入对输出结果的影响,根据信息重要性赋予不同的权重,其自适应分配机制在预测模型优化中具有显著优势,增强了模型捕捉环境因子动态变化的能力,提高了预测精度,同时使黑箱模型可视化,提高模型的可解释性。本文构建了将时间注意力机制和特征注意力机制混叠的混合注意力机制,其结构如图 1 所示,根据模型构建的两个 GRU 模块,在第一模块中引入特征注意力机制对输入变量  $x_i$  进行编码,得到经特征权重分配后的输入因子  $h_i$  并导入第二模块,在第二模块的解码阶段,引入时间注意力机制,将解码输出的隐藏状态与 softmax 函数导出的时间步权重矩阵结合,最终通过全连接层进行输出。在大坝变形预测中,各影响因子的权重显著影响了预测模型的准确性,随着权重分布的不断更新,模型逐渐接近最佳精度,可以认为此时权重分配达到最科学合理的状态,则该机制在增强模型性能的同时,获得的各因子权重可作为大坝变形影响机理分析的依据。

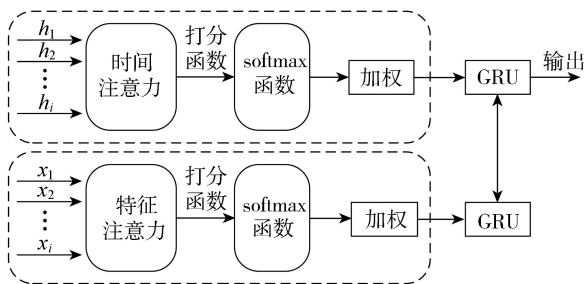


图 1 混合注意力机制结构

### 1.4 建模流程

采用融合特征维度注意力和时间维度注意力的混合注意力机制,结合 WOA 和 BiGRU 的优点,构建

了本文模型,其流程如图 2 所示,主要包含以下 3 个方面:

a. 原始数据获取与预处理。将获得的原始观测数据进行缺值插补、异常值检测后进行归一化并按照确定比例划分训练集和测试集。

b. 模型构建与训练。将训练集导入模型,通过 WOA 确定超参数并对模型进行训练,利用混合注意力机制分配权重并导出权重矩阵。

c. 模型预测与分析。利用所训练模型对测试集进行预测,对预测结果反归一化并进行预测性能以及影响机制分析。

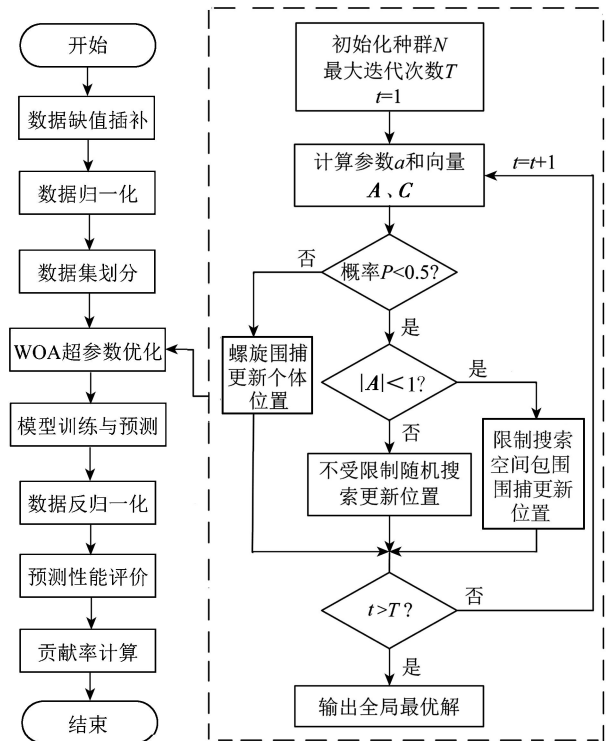


图 2 组合预测模型建模流程

为评价模型预测精度,采用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 3 项指标进行综合判别。

## 2 模型验证

### 2.1 工程背景

以西南某混凝土高拱坝为例进行模型验证。该坝为雅砻江控制性工程,属 I 等大(1)型工程,坝顶高程 1885 m,最大坝高 305 m,总装机容量 3 600 MW,总库容 77.6 亿  $m^3$ ,共 26 个坝段。该坝坝体混凝土于 2009 年 10 月 23 日开始浇筑,2013 年 8 月 30 日首批机组发电,2013 年 12 月 23 日全线浇筑到顶,水库正常蓄水位 1880 m,死水位 1 800 m,校核洪水位 1 882.6 m,2014 年 8 月 24 日首次蓄水至正常蓄水位,之后在死水位与正常蓄水位之间呈年周期变化。

该拱坝坝体及基础共布置 10 组正、倒垂线,其中左右岸坝基、垫座各布置 1 组,5 号、9 号、11 号、13 号、16 号、19 号及 23 号坝段各布置 1 组,共有正垂线 40 条、倒垂线 13 条,其测点布置如图 3 所示,图中,PL 为测点编号。本文选用 2014 年 7 月 25 日至 2018 年 12 月 31 日 PL9-1 测点共 1621 组监测数据建立预测模型,取前 1381 组数据为训练集,后 240 组数据为测试集。选用时间段内水位变化过程线及 PL9-1 测点实测变形变化过程线如图 4 所示。

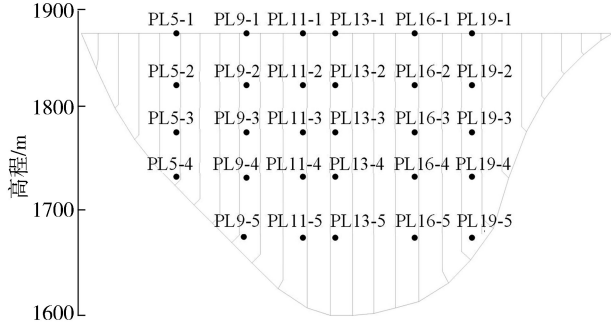
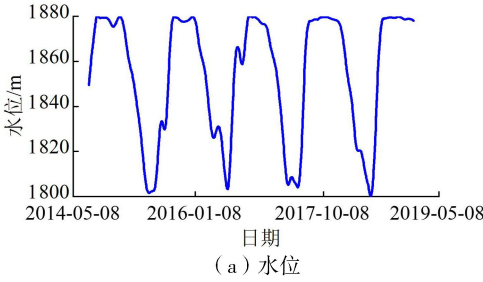
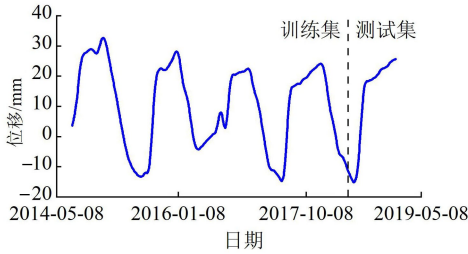


图 3 某拱坝测点布置



(a) 水位



(b) 变形

图 4 某拱坝水位和实测变形变化过程线

## 2.2 数据预处理

根据坝工原理<sup>[13]</sup>,大坝任一点的位移受到水压力、温度荷载等多种因素作用,按其成因可分为水压力分量  $\delta_H$ 、温度分量  $\delta_T$  以及时效分量  $\delta_\theta$ :

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (1)$$

其中

$$\delta_H = \sum_{i=1}^4 a_i (H^i - H_0^i)$$

$$\delta_T = \sum_{i=1}^2 \left[ b_{1i} \left( \sin \frac{2\pi it}{365} - \sin \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right] +$$

$$\sum_{i=1}^2 \left[ b_{2i} \left( \cos \frac{2\pi it}{365} - \cos \frac{2\pi it_0}{365} \right) \right]$$

$$\delta_\theta = c_1 (\theta - \theta_0) + c_2 (\ln \theta - \ln \theta_0)$$

$$\theta = t/100 \quad \theta_0 = t_0/100$$

式中:  $a_i$ 、 $b_{1i}$ 、 $b_{2i}$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为各分量回归系数;  $H_0$  为建模初始日水深;  $H$  为观测日坝前水深;  $t_0$  为始测日到建模初始日累计天数;  $t$  为始测日到观测日累计天数。

综上所述,模型初始输入变量共 10 个,即  $H$ 、 $H^2$ 、 $H^3$ 、 $H^4$ 、 $\sin \frac{2\pi t}{365}$ 、 $\cos \frac{2\pi t}{365}$ 、 $\sin \frac{4\pi t}{365}$ 、 $\cos \frac{4\pi t}{365}$ 、 $\theta$ 、 $\ln \theta$ 。对于缺失的数据,采用线性插值进行补充,数据整理后将输入变量及实测数据进行归一化处理并划分训练集和测试集。

## 2.3 模型训练与预测分析

### 2.3.1 模型参数确定

本文采用 WOA 对模型训练率、训练次数、最大批数、神经元数量  $U_1$  和  $U_2$ 、全连接层神经元数量共 6 个参数进行自动寻优,寻优范围分别为  $[0.001, 0.01]$ 、 $[100, 300]$ 、 $[16, 128]$ 、 $[1, 300]$ 、 $[1, 300]$  和  $[1, 100]$ ,寻优结果分别为 0.0021、271、92、212、153 和 23。

模型内部参数采用 Adam 函数进行优化,激活函数采用 Relu 函数,选择均方误差 (MSE) 作为损失函数,为防止过拟合,设置舍弃层并取为 0.25。

### 2.3.2 预测结果分析与评价

运用本文模型对 PL9-1 测点进行训练与预测,预测结果如图 5 所示,可以看出本文模型预测值与实测值拟合程度较高,分布规律基本一致,预测性能良好,稳定性高,鲁棒性强,其预测值基本落在 95% 预测区间。

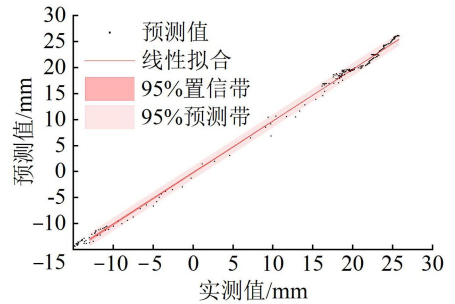


图 5 本文模型预测结果

为验证本文模型的适用程度,与 GRU 模型、BP 模型、MLR 模型进行对比验证,对比结果如图 6 所示。可以看出与 BP 模型和 MLR 模型相比,本文模型和 GRU 模型在预测性能上具有显著的优越性,特别是在拐点和极值点上具有更好的拟合效果,这说明深度学习与浅层机器学习相比,在大坝变形时序数据的预测上能更好地把控环境状态的改变和大坝结构响应的动态特征;与 GRU 模型相比,本文模型拟合程度更高、误差更小,特别是在极值点、变形波动点上更符合实测数据的变化趋势,这表明模型融

合注意力机制后能更好地获取变形量与复杂环境影响因子之间的非线性关系,显著提高局部特征的信息挖掘能力。

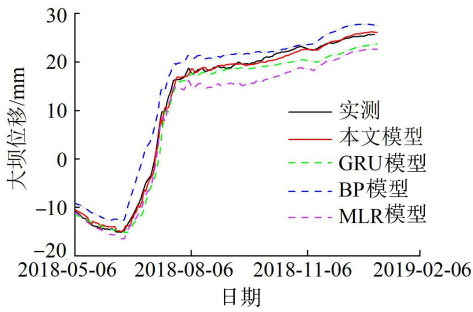


图6 不同模型变形预测结果对比

根据前文拟定评价指标进行计算,结果如表1所示,与其他3种模型相比,本文模型RMSE分别降低了59.61%、73.79%、74.17%,MAE分别降低了59.32%、74.41%、76.05%,图7为各模型残差箱线图,可以看出,本文模型残差波动范围小、均值位于零值附近,整体在零值附近呈现正态分布,综合来看,本文模型预测精度更高、误差更小,具有更强的预测稳定性。

表1 评价指标汇总

模型	$R^2$	RMSE	MAE
本文模型	0.9980	0.0391	0.0325
GRU模型	0.9820	0.0968	0.0799
BP模型	0.9572	0.1492	0.1270
MLR模型	0.9559	0.1514	0.1357

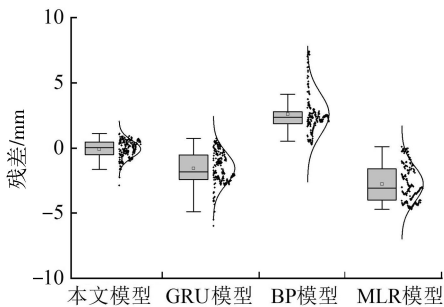


图7 不同模型残差箱线图

### 2.3.3 影响机制分析

本文引入特征注意力和时间注意力机制,根据计算结果导出权重。根据所得特征注意力权重,将水压分量、温度分量、时效分量分别叠加,温度分量占比48.1%,水压分量占比32.1%,时效分量占比19.8%,可以得出以下结论:①时间步权重逐渐上升,即越接近预测时间,信息所产生的影响越大,最近两步对大坝变形产生的影响超过40%;②在影响大坝变形的因素中,温度分量占比最大,时效分量占比最小,这与之前的相关研究成果一致<sup>[23]</sup>,进一步证明了本文模型的物理合理性。

## 3 结语

大坝变形监测研究是大坝安全运行的重要保障,本文针对以往模型中无法充分挖掘大坝变形时序数据的信息、不具备可解释性等问题,提出了基于混合注意力机制和WOA-BiGRU的组合模型。引入BiGRU模型并通过WOA优化模型超参数,兼顾了输入信息的前后关联性,显著提高了模型非线性时序数据的信息挖掘能力,有效解决了模型人工调参的困难,增强了可操作性,提高了模型精度与稳定性。引入混合注意力机制将时间权重和特征权重动态分配,使模型具有适应外部环境因素动态变化的能力,兼具高精度和强解释性的特点。以实际工程为例,对比多种常用预测模型,验证了本模型在大坝变形预测中的可行性与有效性。分析所得权重表明,越接近预测日期,信息重要程度越高;温度效应对大坝变形产生显著影响,水压效应次之,时效影响最小,符合该坝实际情况。

### 参考文献:

- [1] 吴中如,陈波. 大坝变形监控模型发展回眸[J]. 现代测绘,2016,39(5):1-3. (WU Zhongru, CHEN Bo. A review on development of dam safety monitoring models [J]. Modern Surveying and Mapping, 2016, 39(5): 1-3. (in Chinese))
- [2] JIA Jinsheng. A technical review of hydro-project development in China[J]. Engineering, 2016, 2(3): 302-312.
- [3] WILLM G, BEAUJOINT N. Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France-problèmes anciens et solutions nouvelles[C]//International Commission on Large Dams (ICOLD), 9th Congress on Large Dams. Istanbul: ICOLD, 1967: 529-550. (in French)
- [4] PENOT I, FABRE J, DAUMAS B. Monitoring behaviour [J]. International Water Power & Dam Construction, 2005, 57(12): 24-27.
- [5] 徐初,苏怀智,杨立夫. 基于GP-XGBoost的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))
- [6] 胡德秀,屈旭东,杨杰,等. 基于M-ELM的大坝变形安全监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 75-80. (HU Dexiu, QU Xudong, YANG Jie, et al. A safety monitoring model of dam deformation based on M-ELM [J]. Advances in Science and Technology of Water



- Resources,2019,39(3):75-80. (in Chinese))
- [ 7 ] CAO Enhua, BAO Tengfei, GU Chongshi, et al. A novel hybrid decomposition-ensemble prediction model for dam deformation[J]. Applied Sciences,2020,10(16):5700.
- [ 8 ] LI Yangtao, BAO Tengfei, GAO Zhixin, et al. A new dam structural response estimation paradigm powered by deep learning and transfer learning techniques [ J ]. Structural Health Monitoring,2022,21(3):770-787.
- [ 9 ] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(1):21-26. (in Chinese))
- [10] LI Yangtao, BAO Tengfei, GONG Jian, et al. The prediction of dam displacement time series using STL, extra-trees, and stacked LSTM neural network [ J ]. IEEE Access,2020,8:94440-94452.
- [11] 侯回位,郑东健,刘永涛,等. 基于 EEMD-SE-LSTM 的混凝土坝变形监测模型 [ J ]. 水利水电科技进展,2022,42(1):61-66. (HOU Huiwei, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. Deformation monitoring model of concrete dams based on EEMD-SE-LSTM [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):61-66. (in Chinese))
- [12] SHU Xiaosong, BAO Tengfei, LI Yangtao, et al. VAE-TALSTM: a temporal attention and variational autoencoder-based long short-term memory framework for dam displacement prediction [ J ]. Engineering with Computers, 2022,38(4):3497-3512.
- [13] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用 [ M ]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [14] GRAVES A. Long short-term memory [ M ] // GRAVES A. Supervised sequence labelling with recurrent neural networks. Berlin:Springer,2012:37-45.
- [15] CHO K, VAN MERRIËNBOER B, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation [ C ] // Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Doha: ACL, 2014: 1724-1734.
- [16] 赵明,董翠翠,董乔雪,等. 基于 BiGRU 的番茄病虫害问答系统问句分类研究 [ J ]. 农业机械学报,2018,49(5):271-276. (ZHAO Ming, DONG Cuicui, DONG Qiaoxue, et al. Question classification of tomato pests and diseases question answering system based on BiGRU [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):271-276. (in Chinese))
- [17] 耿浩,孙佳华,李艺,等. 基于 BiGRU-Attention 网络的新型冠状病毒肺炎疫情预测 [ J ]. 武汉科技大学学报,2022,45(1):75-80. (GENG Hao, SUN Jiahua, LI Yi, et al. Prediction of COVID-19 epidemic based on BiGRU-Attention network [ J ]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2022, 45 ( 1 ) : 75-80. (in Chinese))
- [18] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [ J ]. Advances in Engineering Software,2016,95:51-67.
- [19] 苏鹏飞,徐松毅,于晓磊. 基于 WOA-LSTM 的窄带通信网络时延预测算法 [ J ]. 河北工业科技,2022,39(1):9-15. (SU Pengfei, XU Songyi, YU Xiaolei. Network delay prediction algorithm based on WOA-LSTM for narrowband communication networks [ J ]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2022,39(1):9-15. (in Chinese))
- [20] 牛培峰,吴志良,马云鹏,等. 基于鲸鱼优化算法的汽轮机热耗率模型预测 [ J ]. 化工学报,2017,68(3):1049-1057. (NIU Peifeng, WU Zhiliang, MA Yunpeng, et al. Prediction of steam turbine heat consumption rate based on whale optimization algorithm [ J ]. CIESC Journal,2017,68(3):1049-1057. (in Chinese))
- [21] 任欢,王旭光. 注意力机制综述 [ J ]. 计算机应用,2021,41(增刊1):1-6. (REN Huan, WANG Xuguang. Review of attention mechanism [ J ]. Journal of Computer Applications,2021,41(Sup1):1-6. (in Chinese))
- [22] MNIH V, HEES N, GRAVES A, et al. Recurrent models of visual attention [ C ] // Proceedings of the 27th International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal: ACM,2014:2204-2212.
- [23] REN Qiubing, LI Mingchao, LI Heng, et al. A novel deep learning prediction model for concrete dam displacements using interpretable mixed attention mechanism [ J ]. Advanced Engineering Informatics,2021,50:101407.

(收稿日期:2022-05-19 编辑:俞云利)



# 基于聚类分区和 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型

刘伟琪<sup>1,2</sup>, 陈波<sup>1,2</sup>, 葛盼猛<sup>1,2</sup>, 张晓玲<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 山东省华诚工程咨询监理有限公司, 山东 高密 261500)

**摘要:**为解决传统单测点监控模型未考虑多测点间的内在关联,难以反映高拱坝变形区域分布特征的问题,提出了基于聚类分区和多输出最小二乘支持向量回归机(MO-LSSVR)的高拱坝变形预测模型。模型基于测点之间的复合相似性指标,借助层次凝聚聚类(HAC)算法实现空间测点的聚类分区,再利用融合测点关联特性的 MO-LSSVR 对分区内多测点进行建模。工程实例验证表明,模型聚类分区结果与坝体变形空间分布特征较吻合,具有较高的准确性和稳健性,为从多测点关联维度预测坝体变形和监控大坝整体安全性态提供了一种新方法。

**关键词:**变形预测;高拱坝;聚类分区;MO-LSSVR

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)02-0102-07

**Deformation prediction model of a high arch dam based on clustering and MO-LSSVR//LIU Weiqi<sup>1,2</sup>, CHEN Bo<sup>1,2</sup>, GE Panmeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>3</sup>(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shandong Huacheng Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Gaomi 261500, China)**

**Abstract:** To solve the problem that the internal correlation between multiple measuring points cannot be considered by traditional single measuring point monitoring models, which is difficult to reflect the regional characteristics of high arch dam deformation in space. A high arch dam deformation prediction model based on clustering partition and a multi-output least square support vector regression machine (MO-LSSVR) algorithm is proposed. Based on the composite similarity index between the measuring points, the clustering partition of spatial correlation measuring points is realized by hierarchical agglomerative clustering (HAC) algorithm. The MO-LSSVR algorithm integrating the correlation characteristics of measuring points is then used to model the points in the partition. The engineering example results show that the clustering partition results are consistent with the spatial distribution characteristics of dam deformation. The MO-LSSVR model based on the reasonable partition results has high accuracy and robustness, which provides a new method to accurately predict the dam deformation and monitoring the overall safety state of the dam from the multi-measuring points correlation dimension.

**Key words:** deformation prediction; high arch dam; spatial clustering; MO-LSSVR

目前我国已建有锦屏、二滩和小湾等超高拱坝,其变形在空间上具有明显且复杂的区域性特征,亟须研究适用于高拱坝空间变形特性的监测模型。然而,常见的监控模型通常仅针对单个测点进行建模,忽略了隐含于各测点监测数据中的整体信息,虽可对大坝全部测点进行单测点建模,但由于缺少对各个测点之间关联性的考虑,无法从空间多测点的机理性关联层面准确反映大坝整体安全性态。传统单

测点监控模型有统计模型、确定性模型和混合模型。已有学者基于传统模型建立了空间多测点位移场的时空分布模型,如何金平等<sup>[1]</sup>推求出多测点水压分量和温度分量的预置因子集,并以此为基础构建了多测点的统计模型;顾冲时等<sup>[2]</sup>在传统方法中融入测点空间坐标,建立了大坝变形的三维多测点正、反分析模型。然而,传统多测点模型本身的局限性制约了其推广和应用,如统计模型存在影响因子间的

基金项目:国家自然科学基金(52079049);国家自然科学基金重点项目(51739003)

作者简介:刘伟琪(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:945988066@qq.com

通信作者:陈波(1986—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:chenbo@hhu.edu.cn

多重共线性问题,一定程度会影响预测效果,且当监测序列过短时,可能会出现过拟合问题<sup>[3]</sup>;确定性模型与混合模型对结构计算的精度依赖程度较高等。而随着人工智能技术的发展,以神经网络为代表的智能算法已被应用到水工安全监控领域并取得了较好的预测效果,如反向传播网络(back propagation, BP)<sup>[4]</sup>、长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)<sup>[5-6]</sup>、极限学习机(extreme learning machine, ELM)<sup>[7]</sup>等。此外,极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)<sup>[8]</sup>、随机森林(random forest, RF)<sup>[9]</sup>等算法也得到了广泛应用。然而,神经网络等算法普遍存在高计算复杂度、模型参数烦琐等缺陷,影响模型的实际应用和泛化。融合先进智能算法建立更有效的多测点变形预测模型,仍值得进一步研究。支持向量回归机(support vector regression, SVR)克服了神经网络的缺点,具有理论基础坚实、泛化性能优越等优点,已成为最实用和成熟的机器学习方法之一。最小二乘支持向量回归机(least square support vector regression, LSSVR)采用等式约束取代了经典 SVR 中的不等式约束,解决了求解耗时的凸二次规划问题,在大坝变形监控领域亦得以广泛应用<sup>[10-12]</sup>。然而,传统的 SVR 仅限于一维输出,对所有测点依次 SVR 单输出建模仍无法解决多输出之间的潜在关联性,难以准确评估大坝整体性状。多输出最小二乘支持向量回归机(multioutput-least square support vector regression, MO-LSSVR)是一种较为新颖的 SVR 改进算法,能够考虑多个输出之间的潜在联系并进行多测点建模,将该算法应用于构建变形监测模型,能有效克服上述现有监控模型的局限性。

高拱坝作为一种大型水工混凝土结构,由于其坝高超高、拱圈跨度大,且根据坝体材料参数分为不同分区,因此不同区域的变形有明显差异,而同一区域多测点的变形具有较强关联性。K-均值、层次凝聚聚类、密度峰值聚类等聚类方法已在水工安全监控领域得到成熟应用,能够从众多测点的海量监测数据中深度挖掘有效信息,对高拱坝的变形区域进行划分,使得同一分区内的测点具有高度关联和相似性,而不同分区间的测点具有明显相异性。在此基础上构建不同分区的多测点模型,能够充分发挥 MO-LSSVR 考虑多测点间潜在关联的优越性,为识别高拱坝变形的区域性特征提供有效帮助。

因此,本文提出一种基于空间聚类分区和 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型,该模型基于复合相似性指标,利用层次凝聚聚类(hierarchical agglomerative clustering, HAC)算法对高拱坝测点进

行空间维度划分;基于聚类结果,对于各分区内的多个测点,利用能够反映各测点关联性的 MO-LSSVR 进行多输出建模,同时与单测点 LSSVR 和统计模型进行比较,以验证本文方法的准确性与有效性;最后加入干扰测点探究不同建模环境下 MO-LSSVR 的稳健性。

## 1 基于复合相似性指标与 HAC 算法的空间聚类分区

高拱坝坝体变形在空间上具有明显区域性特征,为定量分析不同测点的相似程度,需构建测点间的复合相似性指标;之后借助聚类算法实现对大坝变形区域的有效划分,进而对大坝每个分区进行多测点建模。

### 1.1 复合相似性指标及标准化

为充分考虑测值序列的变化趋势,挖掘不同测点之间的相似(异)性特征,从而达到准确、合理的聚类效果,参考已有研究成果<sup>[13]</sup>,定义 3 种变形测值指标如表 1 所示。

表 1 3 种变形测值指标

指标	表达式	表征意义
变形量 $x_{it}$	$x_{it} = \delta_{it}$	变形的数值大小
变形增幅 $y_{it}$	$y_{it} = x_{it} - x_{i,t-1} = \delta_{it} - \delta_{i,t-1}$	变形的数值变化幅度
变形增速 $z_{it}$	$z_{it} = \frac{y_{it}}{x_{i,t-1}} = \frac{\delta_{it} - \delta_{i,t-1}}{\delta_{i,t-1}}$	变形的数值变化速度

注: $\delta_{it}$ 和 $\delta_{i,t-1}$ 分别为第*i*个测点在*t*时刻和*t-1*时刻的变形值。

表 1 中 3 种指标性质不同,其量纲和数量级也存有差异,不适合直接用原始值进行计算分析。因此采用 Z-score 标准化方法对原始指标值进行标准化处理。以  $x_{it}$  为例,若有  $n$  个测点及  $T$  个时间点,先计算出  $x_{it}$  的均值  $\mu_x$  和标准差  $\sigma_x$ ,再利用下式进行标准化操作:

$$Z(x_{it}) = \frac{x_{it} - \mu_x}{\sigma_x} \quad (1)$$

同理可对其他两种指标进行标准化处理,标准化后的指标均值为 0,标准差为 1。基于上述 3 种标准化后的指标,定义测点  $i$  和测点  $j$  之间的 3 种距离如表 2 所示。

表 2 表征相似性的 3 种距离

名称和符号	表达式	表征意义
绝对距离 $d_{ij,AD}$	$d_{ij,AD} = \sum_{i=1}^T [Z(x_{it}) - Z(x_{jt})]^2$	测点 $i$ 和测点 $j$ 测值数值大小的差异
增量距离 $d_{ij,ID}$	$d_{ij,ID} = \sum_{i=1}^T [Z(y_{it}) - Z(y_{jt})]^2$	测点 $i$ 和测点 $j$ 测值变化幅度的差异
相对增速距离 $d_{ij,RCD}$	$d_{ij,RCD} = \sum_{i=1}^T [Z(z_{it}) - Z(z_{jt})]^2$	测点 $i$ 和测点 $j$ 测值变化速度的差异

将表2中3种距离指标结合可得到描述空间测点*i*和测点*j*之间的复合相似性指标 $d_{ij,CD}$ ,其定义为

$$d_{ij,CD} = \alpha_1 d_{ij,AD} + \alpha_2 d_{ij,ID} + \alpha_3 d_{ij,RCD} \quad (2)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为3种距离指标的权重,且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ ,本文拟定 $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.3$ 。

## 1.2 HAC 算法

K-均值、最大期望算法等平面聚类方法输出的是平面无结构聚类集合,其缺陷在于计算前需首先定义初始点及聚类数目,且聚类效果对于初始参数的选择较为敏感。考虑到大坝实测数据在时序长度及测点数量上数据量庞大,不能对聚类数量等初始参数进行精准划分,故本文采用 HAC 算法进行空间测点的聚类分区。该算法的聚类策略表现为:先将各个对象分别作为一个典型簇,通过不断重复地合并最近的两个典型样本点/簇进行聚类,最终生成聚类层次树结构,并根据迭代终止条件(如阈值切线)划分层次树,输出聚类结果。

## 2 基于 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型构建

### 2.1 经典单输出 LSSVR

单输出 LSSVR 由 Suykens 等<sup>[14-15]</sup>提出,用等式约束代替经典支持向量回归中的不等式约束,并进一步简化约束条件,将原始二次规划问题转换为线性方程组求解问题。假设样本数量为  $N$ ,对于给定训练集 $\{(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, N\}$ ,构造下列最小化目标函数:

$$\min J(\mathbf{w}, \boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} \gamma \boldsymbol{\xi}^T \boldsymbol{\xi} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } y_i = \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(x_i) + b + \xi_i \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}(x_i)$ 为低维输入空间到高维特征空间的映射函数; $\mathbf{w}, b$ 分别为权重向量和偏置; $\gamma$ 为正则化参数; $\boldsymbol{\xi}$ 为由松弛变量构成的向量。

引入拉格朗日函数,上述问题求解可转化成对以下线性方程组的求解:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{e}^T \\ \mathbf{e} & \mathbf{K} + \gamma^{-1} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{e} = (1, 1, \dots, 1)$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 为拉格朗日乘子向量; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{K}$ 为核函数,其作用体现在训练数据映射到高维度特征空间后能够代替回归运算,从而将非线性问题转换为线性问题。径向基核函数是最常用且效果较好的核函数之一,其表达式为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\sigma^2}\right) = \exp(-\rho \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}, \mathbf{x}_i$ 为输入值; $\sigma$ 为核函数作用范围; $\rho$ 为径向基核函数唯一的超参数, $\rho = 1/2\sigma^2$ 。

结合 KKT 约束条件,求得式(5)的解 $\boldsymbol{\alpha}^*$ 和 $b^*$ ,故最小二乘支持向量回归函数 $f(\mathbf{x})$ 表示为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b^* \quad (7)$$

### 2.2 关联多输出 MO-LSSVR

MO-LSSVR 将输入测点视作整体并考虑多测点之间潜在的关联性,将单输出场景推广到多输出场景。假设共有  $M$  个输出, $N_m$ 为第  $m$  个输出的样本数量,给定训练集 $\{(\mathbf{x}_{m,i}, y_{m,i}) | i=1, 2, \dots, N_m\}$ ,其函数可表示为 $f_m(\mathbf{x}) = \mathbf{w}_m^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + b_m$ ,其中 $\mathbf{w}_m$ 和 $b_m$ 分别为模型的第  $m$  个输出的权重向量和偏置。

为了将测点间的潜在关联性考虑在内,基于正则化多目标学习<sup>[16]</sup>的思想,假设权重向量由两部分组成, $\mathbf{w}_m = \mathbf{w}_0 + \mathbf{v}_m$ ,其中 $\mathbf{w}_0$ 为公共权重向量,而 $\mathbf{v}_m$ 为个体权重向量,即认为各测点权重向量 $\mathbf{w}_m$ 以 $\mathbf{w}_0$ 为基准,以 $\mathbf{v}_m$ 为幅度而发生波动。两测点之间关联性越强,则 $\mathbf{w}_0$ 所占权重越大;关联性越弱,则 $\mathbf{v}_m$ 所占权重越大。构造下列最小化目标函数:

$$\min J(\mathbf{w}_0, \mathbf{v}_m, \boldsymbol{\xi}_m) = \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^T \mathbf{w}_0 + \frac{1}{2} \frac{\lambda}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{v}_m^T \mathbf{v}_m + \frac{1}{2} \gamma \sum_{m=1}^M \boldsymbol{\xi}_m^T \boldsymbol{\xi}_m \quad (8)$$

$$\text{s. t. } y_{m,i} = (\mathbf{w}_0 + \mathbf{v}_m)^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}_{m,i}) + b_m + \xi_{m,i} \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\xi}_m$ 为由松弛变量构成的向量; $\lambda$ 为超参数。

类似于 LSSVR,通过引入式(8)和式(9)所对应的拉格朗日函数,可转化为对其对应线性方程组的求解。记方程组的解为 $\boldsymbol{\alpha}^* = (\boldsymbol{\alpha}_1^*, \boldsymbol{\alpha}_2^*, \dots, \boldsymbol{\alpha}_M^*)$ , $\boldsymbol{\alpha}_m = (\alpha_{m,1}^*, \alpha_{m,2}^*, \dots, \alpha_{m,N_m}^*)$ 和 $\mathbf{B}^* = (b_1^*, b_2^*, \dots, b_M^*)$ ,则对于单个输出  $m$ ,其最小二乘支持向量回归函数为

$$f_m(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \alpha_{m,i}^* K(\mathbf{x}_{m,i}, \mathbf{x}) + \frac{M}{\lambda} \sum_{i=1}^{N_m} \alpha_{m,i}^* K(\mathbf{x}_{m,i}, \mathbf{x}) + b_m^* \quad (10)$$

将上述两种 SVR 方法进行对比,结果如表3所示。相比于经典 LSSVR,MO-LSSVR 适用于多输出场景,且同时考虑了不同输出间的相关性,只比 LSSVR 多了1个超参数 $\lambda$ 。假设以  $n$  个测点的变形为输出目标,MO-LSSVR 仅需建模1次,需求解的参数共3个;而 LSSVR 需要对  $n$  个测点分别建模,共需求解参数  $2n$  个,故在模型训练的精简度上 MO-LSSVR 占

表3 两种 SVR 方法的对比

方法	类型	相关性考量	参数
LSSVR	多输入+单输出	否	$\gamma, \rho$
MO-LSSVR	多输入+多输出	是	$\lambda, \gamma, \rho$

优。由此可见,MO-LSSVR 具有 LSSVR 所不具备的优势。

### 2.3 基于 MO-LSSVR 的高拱坝变形预测模型构建步骤

结合上文基于 HAC 算法的测点空间聚类分区和关联多输出的 MO-LSSVR,可以实现高拱坝变形预测模型的构建,主要步骤如下:

**步骤 1** 变形实测数据预处理。主要完成各测点原始测值序列中的粗差剔除和缺失值填补工作。

**步骤 2** 复合相似性指标计算。计算坝体各变形测点之间的复合相似性指标,得到复合距离矩阵。

**步骤 3** 坝体测点聚类分区。基于各测点的复合距离矩阵,对所有测点进行层次凝聚聚类,得到空间分区结果。

**步骤 4** 定义输入与输出。模型的输出变量为同一分区  $n$  个测点的变形测值 $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$ ,输入变量为基于高拱坝统计模型中的各分量因子。

根据传统监控理论,大坝变形  $\delta$  主要由水压分量  $\delta_H$ 、温度分量  $\delta_T$  和时效分量  $\delta_\theta$  构成<sup>[17]</sup>,即

$$\delta = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \quad (11)$$

对于本文所研究的高拱坝,其水压分量通常与上游水位的 1、2、3、4 次方,即  $H$ 、 $H^2$ 、 $H^3$  和  $H^4$  有关,可表示为

$$\delta_H = \sum_{i=1}^4 [a_{i1}(H^i - H_0^i)] \quad (12)$$

式中: $H$ 、 $H_0$  分别为  $t$  时刻的上游水位和坝基高程; $a_{i1}$  为拟合系数。

温度分量通常采用组合多种谐波的方法进行模拟,可表示为

$$\delta_T = \sum_{p=1}^2 \left[ b_{1p} \left( \sin \frac{2\pi pt}{365} - \sin \frac{2\pi pt_0}{365} \right) + b_{2p} \left( \cos \frac{2\pi pt}{365} - \cos \frac{2\pi pt_0}{365} \right) \right] \quad (13)$$

式中: $t$ 、 $t_0$  分别为监测序列某时刻和基准时刻; $b_{1p}$ 、 $b_{2p}$  为拟合系数; $p$  为时间参数, $p=1$  表示年周期, $p=2$  表示半年周期。

时效分量一般用多项式和对数函数来描述,可表示为

$$\delta_\theta = c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \quad (14)$$

式中: $\theta$ 、 $\theta_0$  分别为  $t$  时刻和基准时刻的时效因子; $c_1$ 、 $c_2$  为拟合系数。

综上所述,混凝土高拱坝统计模型表达式可描述为<sup>[18]</sup>

$$\delta = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_{i1}(H^i - H_0^i)] + \sum_{p=1}^2 \left[ b_{1p} \left( \sin \frac{2\pi pt}{365} - \sin \frac{2\pi pt_0}{365} \right) + \right.$$

$$\left. b_{2p} \left( \cos \frac{2\pi pt}{365} - \cos \frac{2\pi pt_0}{365} \right) \right] + c_1(\theta - \theta_0) + c_2(\ln\theta - \ln\theta_0) \quad (15)$$

式中  $a_0$  为常数。

由此确定 MO-LSSVR 的输入变量  $x$  共有 10 项,可表示为

$$x = (H, H^2, H^3, H^4, T_{\sin 1}, T_{\cos 1}, T_{\sin 2}, T_{\cos 2}, \Theta_1, \Theta_2) \quad (16)$$

式中: $T_{\sin 1}$ 、 $T_{\sin 2}$  分别为年周期和半年周期正弦谐波因子; $T_{\cos 1}$ 、 $T_{\cos 2}$  分别为年周期和半年周期余弦谐波因子; $\Theta_1$ 、 $\Theta_2$  分别为多项式时效因子和对数时效因子。

基于式(15)可确定各变量的计算公式如下:

$$\begin{cases} T_{\sin 1} = \sin \frac{2\pi t}{365} - \sin \frac{2\pi t_0}{365} \\ T_{\sin 2} = \sin \frac{4\pi t}{365} - \sin \frac{4\pi t_0}{365} \\ T_{\cos 1} = \cos \frac{2\pi t}{365} - \cos \frac{2\pi t_0}{365} \\ T_{\cos 2} = \cos \frac{4\pi t}{365} - \cos \frac{4\pi t_0}{365} \\ \Theta_1 = \theta - \theta_0 \\ \Theta_2 = \ln\theta - \ln\theta_0 \end{cases} \quad (17)$$

**步骤 5** 参数寻优与模型训练。将各测点测值序列前 80% 作为训练集进行训练。MO-LSSVR 的性能较大程度上取决于模型参数的取值,本文采用支持向量机类算法最为常用的十倍交叉验证结合网格搜索算法<sup>[19]</sup>,按照最小均方误差原则确定模型最优参数  $\lambda^*$ 、 $\gamma^*$  和  $\rho^*$ 。由于网格搜索本质上为穷举算法,故能保证参数寻优的精度要求,避免计算结果出现随机性。可采用相同方法确定 LSSVR 的最优参数  $\gamma^*$  和  $\rho^*$ 。

**步骤 6** 模型预测与效果评估。以各测点测值序列后 20% 作为验证集进行预测,并将预测结果与各测点实际变形进行比较。为进一步量化两种模型的建模效果,考虑相关系数、均方根误差 RMSE 及平均绝对误差 MAE 这 3 项指标以评估模型精度。

## 3 模型验证

### 3.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省雅砻江干流,工程属大(1)型一等工程,大坝为混凝土双曲拱坝。坝顶高程 1 885.00 m,建基面高程 1 580.00 m,最大坝高 305.00 m,为当今世界最高坝。坝体共布置 29 个正垂线测点进行坝体变形监控,测点分布较为均匀,可较为全面地反映大坝整体变形。

选取大坝自 2016 年 7 月 23 日至 2021 年 3 月 19

日的正垂线监测数据和环境量数据进行分析,并完成原始数据的预处理。由于各变形测点的原始时间序列都较为完整、平滑,不存在测值残缺、错误异常等数据污染问题,因此只对极个别粗差进行人为剔除,采用相邻测值对缺失值进行线性差值填补。将2016年7月23日至2020年3月18日的数据作为训练集,2020年3月19日至2021年3月19日的数据为测试集,其比例约为4:1。

### 3.2 基于 HAC 算法的聚类分区

计算坝体全部测点之间表征相似性的3种距离,并基于式(2)求得复合相似性指标,得到复合距离矩阵。根据复合距离矩阵,以平均链距离为聚类划分的判定标准,对坝体测点进行 HAC 聚类并将其划分为3个区域,如图1所示。其中,Ⅰ号分区测点在大坝靠近两岸处呈对称分布,Ⅱ号分区测点集中在拱坝的中部中、低高程部位,Ⅲ号分区测点分布在高高程部位。综合来看,聚类分区结果与锦屏大坝依据坝体材料形成的分区具有一定关联,且与大坝径向位移分布特征较为契合,证明分区结果较为合理。聚类之后,同一分区的测点变形变化规律具有较高相似性,能够综合反映坝体变形在空间维度上的区域分布特征。

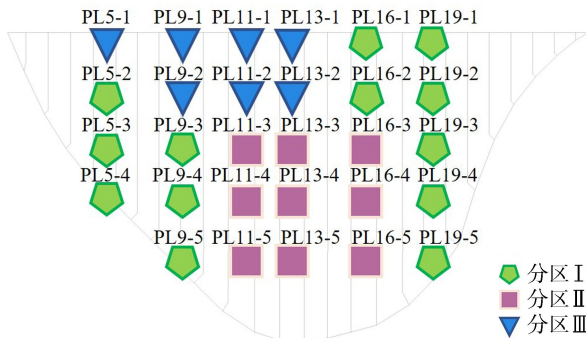


图1 坝体测点 HAC 聚类分区结果

### 3.3 模型的预测结果评估

以坝体中部Ⅱ号分区为例,给出 MO-LSSVR 模型的构建过程及预测结果。首先利用十倍交叉验证和网格搜索算法选参,参数  $\lambda$ 、 $\gamma$  和  $p$  分别从  $\{2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^{13}, 2^{15}\}$ 、 $\{2^{-10}, 2^{-8}, \dots, 2^8, 2^{10}\}$  和  $\{2^{-5}, 2^{-3}, \dots, 2^8, 2^{10}\}$  中进行取值,按最小均方差原则确定模型

3个最优超参数分别为  $\lambda^* = 2^9$ 、 $\gamma^* = 2^0$ 、 $\rho^* = 2^{-1}$ 。基于最优超参数构建预测模型,对测试数据集进行预测并验证建模效果。为突出 MO-LSSVR 模型的优越性,对分区内各测点分别构建 LSSVR 模型和统计模型两种单输出模型作为对比。

针对Ⅱ号分区的9个测点,3种模型的预测效果及精度评估如图2(为节约篇幅,仅列出代表测点预测结果)和表4所示。可以看出,3种模型中,传统模型的预测值与实际变形的偏差最大;相比之下,两种基于 SVR 的模型能更为准确地反映大坝变形及其影响因素之间的非线性关系。传统单输出 LSSVR 模型的精度略高于统计模型,而本文提出的

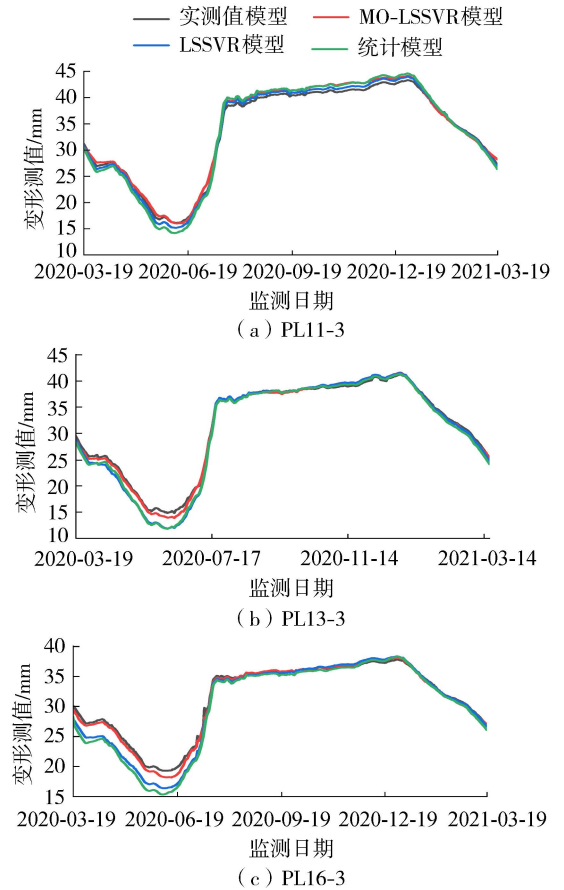


图2 3种模型预测过程线对比

表4 3种模型预测精度评估

测点	RMSE			MAE			相关系数		
	统计模型	LSSVR 模型	MO-LSSVR 模型	统计模型	LSSVR 模型	MO-LSSVR 模型	统计模型	LSSVR 模型	MO-LSSVR 模型
PL16-3	2.196	1.975	1.303	1.872	1.599	1.051	0.9249	0.9327	0.9973
PL16-4	2.189	1.744	0.990	1.944	1.395	0.758	0.9203	0.9395	0.9989
PL16-5	2.631	2.257	1.592	2.433	1.842	1.335	0.8997	0.9238	0.9924
PL13-3	1.947	1.448	1.146	1.762	1.287	1.034	0.9219	0.9374	0.9956
PL13-4	2.028	1.692	1.047	1.769	1.358	0.837	0.9322	0.9396	0.9946
PL13-5	2.469	2.042	1.120	2.321	1.607	0.934	0.9017	0.9367	0.9919
PL11-3	2.211	2.176	1.399	1.993	1.924	1.152	0.9089	0.9134	0.9952
PL11-4	1.821	1.791	1.039	1.328	1.414	0.797	0.9249	0.9521	0.9982
PL11-5	1.599	1.329	0.428	0.903	0.875	0.347	0.9259	0.9388	0.9976

MO-LSSVR 模型得到的变形预测值最接近实测值,各测点相关系数均超过 0.99,且 MAE、RMSE 指标最小,预测性能明显优于其他两种单输出模型,由此验证了本文方法的有效性。

### 3.4 干扰测点对 MO-LSSVR 模型精度的影响

为探究引入干扰项对 MO-LSSVR 模型精度的影响,仍选择 II 号分区的 9 个测点作为建模对象,考虑加入与该分区相似性最差的测点进行建模并评估预测结果。经过比对,选取与 II 号分区各测点复合距离最远的 PL9-1 作为干扰测点。从空间分布看,II 号分区位于大坝中部的中、低高程部位,而 PL9-1 测点位于大坝靠近左岸坝肩的高高程部位,两者所在的坝体部位属不同材料分区,在荷载下的变形响应特征具有明显差异。观察上述 10 个测点测值变化曲线,同样可以发现 PL9-1 与其他测点的测值变化趋势有明显区别。

因此,建模测点集合选取具有强空间关联的 II 号分区 9 个测点及与其复合相似性最差的 PL9-1 测点,以此构建 MO-LSSVR 模型,模型超参数寻优结果为  $\lambda^* = 2^{-3}$ 、 $\gamma^* = 2^{-10}$ 、 $\rho^* = 2^{-1}$ 。同时为形成对比,对 PL9-1 测点所属 III 号分区进行 MO-LSSVR 建模,模型预测结果如图 3 和表 5 所示。由表 5 可知,加入 PL9-1 干扰测点,对原分区内 9 个测点的建模精度基本无影响,但干扰测点自身的预测效果相对较

差,其原因可能是 II 号分区内的测点具有更强关联性,而 PL9-1 与其他测点的复合距离最远,它们之间的关联性也稍弱,一定程度上影响了本身的建模精度。然而,当 PL9-1 参与所在 III 号分区的多测点建模时,由图 3 可以看出其预测曲线比作为 II 区干扰测点时的预测曲线更逼近实测值,能够达到 MO-LSSVR 应有的预测精度。因此验证 MO-LSSVR 能够充分挖掘不同测点之间的关联特性,并具有较强的稳健性和抗干扰能力;同时进一步说明了基于复合距离指标进行聚类分区的合理性,通过聚类分区将相似性最大的测点归为一类,保证了分区内各测点在空间变形特征上具有更高相似性和关联性,之后再对其进行 MO-LSSVR 多输出建模,从而有助于保证预测精度。

## 4 结论

- a. 基于复合相似性指标和 HAC 算法得到的聚类分区结果符合坝体一般变形规律,能够反映坝体变形的空间分布特征。
- b. 基于聚类分区结果构建的 MO-LSSVR 模型能够挖掘分区多测点的内在关联性,比传统统计模型、LSSVR 模型具有更高精度和合理性,能够准确反映大坝整体安全状态。
- c. 通过加入干扰测点,验证了 MO-LSSVR 模型具有较强稳健性和抗干扰能力的结论;同时说明建模环境对预测效果有一定影响,聚类分区有助于提升多测点建模精度。
- d. 在各算法中,MO-LSSVR 的预测精度和泛化性能在一定程度上受超参数取值的影响,本文选择了最常用的交叉验证和网格搜索算法确定其最优参数。然而,采用 MO-LSSVR 对多测点进行建模需要大量的训练样本,一定程度上增加了参数寻优的计算量。因此,兼具效率和准确性的智能算法应在下一步的工作中进行深入研究。

## 参考文献:

[1] 何金平,李珍照.大坝结构性态多测点数学模型研究[J].武汉水利电力大学学报,1994,27(2):134-136. (HE Jinping, LI Zhenzhao. Research on the mathematical model of multiple survey points for dam structure behaviour[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1994, 27(2): 134-136. (in Chinese))

[2] 顾冲时,吴中如,蔡新.探讨混凝土坝空间位移场的正反分析模型[J].工程力学,1997,14(1):138-144. (GU Chongshi, WU Zhongru, CAI Xin. Analysis and back analysis model of 3d displacement field of concrete dams [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(1): 138-144. (in

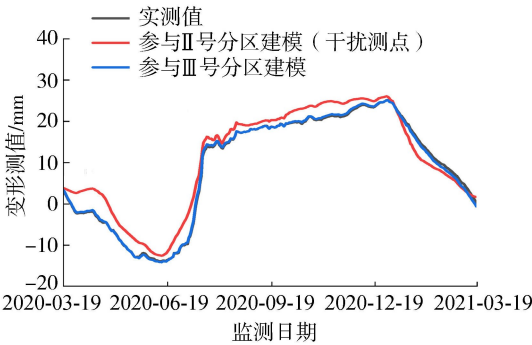


图3 PL9-1 测点在两种建模环境下的模型预测结果

表5 PL9-1 与 II 号分区测点 MO-LSSVR 模型预测精度评估

测点	建模情况	RMSE	MAE	相关系数
PL16-3	参与 II 号分区建模	1.4723	1.2250	0.9944
PL16-4	参与 II 号分区建模	1.7759	1.5112	0.9919
PL16-5	参与 II 号分区建模	1.3177	1.2246	0.9905
PL13-3	参与 II 号分区建模	1.0876	0.8365	0.9956
PL13-4	参与 II 号分区建模	1.0784	0.8139	0.9946
PL13-5	参与 II 号分区建模	1.1894	0.9789	0.9866
PL11-3	参与 II 号分区建模	1.6686	1.4812	0.9944
PL11-4	参与 II 号分区建模	1.2868	1.1133	0.9952
PL11-5	参与 II 号分区建模	0.3980	0.3137	0.9973
PL9-1	参与 II 号分区建模	3.1377	2.7472	0.9149
PL9-1	参与 III 号分区建模	1.5980	1.2311	0.9892

- Chinese))
- [ 3 ] SU Huaizhi, HU Jiang, WU Zhongru. A study of safety evaluation and early-warning method for dam global behavior[J]. *Structural Health Monitoring*, 2012, 11(3): 269-279.
- [ 4 ] 闫滨,高真伟,强丽峰. 基于 L-M 算法的 BP 神经网络在大坝安全监控预报中的应用[J]. *沈阳农业大学学报*, 2009, 40(4): 506-509. (YAN Bin, GAO Zhenwei, QIANG Lifeng. Application of BP neural network based on levenberg-marquardt algorithm in prediction of dam safety monitoring[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2009, 40(4): 506-509. (in Chinese))
- [ 5 ] 欧斌,吴邦彬,袁杰,等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1): 21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1): 21-26. (in Chinese))
- [ 6 ] 侯回位,郑东健,刘永涛,等. 基于 EEMD-SE-LSTM 的混凝土坝变形监测模型[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1): 61-66. (HOU Huiwei, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. Deformation monitoring model of concrete dams based on EEMD-SE-LSTM[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1): 61-66. (in Chinese))
- [ 7 ] 胡德秀,屈旭东,杨杰,等. 基于 M-ELM 的大坝变形安全监控模型[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(3): 75-80. (HU Dexiu, QU Xudong, YANG Jie, et al. A safety monitoring model of dam deformation based on M-ELM [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(3): 75-80. (in Chinese))
- [ 8 ] 徐彻,苏怀智,杨立夫. 基于 GP-XGBoost 的大坝变形预测模型[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(5): 41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))
- [ 9 ] 田菊飞,苏怀智. 基于随机森林算法的大坝应力预测模型的构建及其应用[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(5): 54-56. (TIAN Jufei, SU Huaizhi. Development and application of dam stress prediction model based on random forest algorithm[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(5): 54-56. (in Chinese))
- [ 10 ] 林楠,李伟东,张文春,等. 最小二乘支持向量机在深基坑变形预测中的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(11): 1471-1474. (LIN Nan, LI Weidong, ZHANG Wenchun, et al. Deformation prediction of deep foundation pit with least square support vector machine [J]. *Journal of Liaoning Technical University* (Natural Science), 2014, 33(11): 1471-1474. (in Chinese))
- [ 11 ] 宋志宇,李俊杰. 最小二乘支持向量机在大坝变形预测中的应用[J]. *水电能源科学*, 2006, 24(6): 49-52. (SONG Zhiyu, LI Junjie. Research on dam displacement forecasting model based on least squares support vector machine[J]. *Water Resources and Power*, 2006, 24(6): 49-52. (in Chinese))
- [ 12 ] 冯腾飞,钟钰,刘小生,等. 基于自适应人工蜂群算法优化的最小二乘支持向量机在变形预测中的应用[J]. *江西理工大学学报*, 2018, 39(3): 35-39. (FENG Tengfei, ZHONG Yu, LIU Xiaosheng, et al. Application in deformation prediction based on LSSVR model optimized by AABC[J]. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 2018, 39(3): 35-39. (in Chinese))
- [ 13 ] CHEN Bo, HU Tianyi, HUANG Zishen, et al. A spatio-temporal clustering and diagnosis method for concrete arch dams using deformation monitoring data [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(5/6): 1355-1371.
- [ 14 ] SUYKENS J. Least squares support vector machines[J]. *International Journal of Circuit Theory & Applications*, 2002, 27(6): 605-615.
- [ 15 ] EVGENIOU T, PONTIL M. Regularized multi-task learning [C]//*Proceedings of the tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Seattle, [s. n.], 2004.
- [ 16 ] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [ 17 ] 王继敏,顾冲时,张晨,等. 基于面板时空模型的锦屏一级大坝变形性态分析[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(11): 21-30. (WANG Jimin, GU Chongshi, ZHANG Chen, LIU Jian. Deformation behavior analysis of Jinping arch dam based on spatiotemporal model of variable intercept panel data [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(11): 21-30. (in Chinese))
- [ 18 ] 袁玉萍,胡亮,周志坚. 基于遗传算法对支持向量机模型中参数优化[J]. *计算机工程与设计*, 2008, 29(19): 5016-5018. (YUAN Yuping, HU Liang, ZHOU Zhijian. Optimizing parameters of support vector machine's model based on genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(19): 5016-5018. (in Chinese))
- [ 19 ] 徐硕,乔晓东,朱礼军,等. 多任务最小二乘支持向量回归机及其在近红外光谱分析技术中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1208-1211. (XU Shuo, QIAO Xiaodong, ZHU Lijun, et al. Multi-task least-squares support vector regression machines and their applications in nir spectral analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1208-2111. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-10 编辑:骆超)



# 大坝变形监测异常数据识别和重构模型

黎 祎<sup>1,2,3</sup>, 赵二峰<sup>1,2,3</sup>, 何 菁<sup>4</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098;  
4. 南京市水利建筑工程检测中心有限公司, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 针对混凝土坝变形监测数据中的粗差和异常测值问题, 提出了一种数据异常识别和重构模型。模型利用关联规则量化变形序列与水位序列的关联性, 将监测数据输入 DBSCAN 聚类算法寻找异常点, 利用关联结果将监测数据异常点分为粗差点与反映大坝性态点两类, 保留反映大坝性态点, 剔除粗差点, 并利用改进的小波神经网络对粗差数据进行重构, 保证监测序列完整性。某拱坝变形监测数据验证结果表明, 该模型可以准确识别监测数据中的异常值, 并能够获得更为准确的重构数据, 为大坝实测性态评价提供了新的分析方法。

**关键词:** 异常数据; 数据重构; 关联规则; DBSCAN 算法; 小波神经网络

中图分类号: TV698.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)02-0109-06

**Abnormal data identification and reconstruction model of dam deformation monitoring**//LI Yi<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Erfeng<sup>1,2,3</sup>, HE Jing<sup>4</sup>(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Nanjing Water Conservancy Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of gross errors and abnormal measurements in the deformation monitoring data of concrete dams, a data anomaly identification and reconstruction model is proposed. The association rules are used to quantify the correlation between deformation sequences and water level sequences, and the monitoring data are input into the DBSCAN clustering algorithm to find the abnormal points. The association results are used to classify the data abnormal points into two categories, coarse error points and points reflecting the dam morphology. The points reflecting the dam morphology are retained and the coarse error points are eliminated, and modified wavelet neural network is used to reconstruct the coarse difference data to ensure the integrity of the monitoring sequence. The application results of an arch dam deformation monitoring data show that the model can accurately identify the abnormal values in the monitoring data and can obtain more accurate reconstructed data, providing a new analysis method for the evaluation of measured properties of a dam.

**Key words:** abnormal data; data reconstruction; association rules; DBSCAN algorithm; wavelet neural network

大坝运行安全监测过程中, 由于结构性态变化、环境量异常、监测系统改造或系统故障等多重不确定性随机因素的作用, 难免存在监测数据异常的情况<sup>[1]</sup>。由人为误测和系统故障等造成的数据异常称为粗差, 粗差的存在会严重“污染”监测数据。传统粗差判别的准则常基于统计学理论, 可以采用数学模型<sup>[1-3]</sup>, 也可以采用机器学习方法, 例如: 王丽蓉等<sup>[4]</sup>利用卷积神经网络进行异常识别, 解决辨别非最值异常点的问题; 赵新华等<sup>[5]</sup>将大坝监测数据进行分解与重构, 引入孤立森林进行异常检测; 蒋齐嘉

等<sup>[6]</sup>提出了一种基于奇异谱分析和密度聚类算法的粗差探测法; 黄成章等<sup>[7]</sup>考虑时间和截面两个维度, 提出一种混凝土坝变形监测缺失数据处理新方法, 此类机器学习方法也可以用于大坝位移数据的分析与应用, 具有较高的预测精度<sup>[8-10]</sup>。尽管如此, 这些方法大都着眼于时间序列内的差异, 没有考虑大坝与环境量的相互作用, 导致反映大坝性态的异常点被判定为误差点, 造成误判。

为解决上述问题, 本文采用 Apriori 关联规则考虑实测位移与环境量的关联性, 通过剖析异常监测

基金项目: 国家自然科学基金(U2243223, 51739003, 52079046); 中央高校基本科研业务费专项(B210202017)

作者简介: 黎祎(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: 1084334829@qq.com

通信作者: 赵二峰(1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: zhaoerfeng@hhu.edu.cn

数据包含的信息,联合效应量和环境量实测序列的关联性准确识别异常值,建立粒子群算法改进小波神经网络的异常数据重构模型,以期提升大坝监测数据分析的有效性。

## 1 模型构建

### 1.1 监测数据粗差识别

Apriori 算法具有自动删除非频繁子集来提高效率的优势<sup>[11]</sup>,可以解析序列间的相互作用;具有噪声的基于密度的聚类方法<sup>[6]</sup>(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)可以发现任何形状的聚类,可用于搜寻异常点。因此本文将这两种算法综合起来,进行监测数据粗差识别。

Apriori 算法根据阈值逐层搜索频繁项集,利用 Apriori 算法进行监测数据关联性分析时,需要将数据类型调整为布尔类型,即把输入的数据进行符号化。将输入  $X, Y$  两序列用滑动窗口分段截取,对截取的子序列进行线性拟合,得到每段数据的斜率,将斜率标准化,使数值变换在  $[-1, 1]$  之间,再对其进行符号化表示(子序列分别表示为  $x_i$  和  $y_j$ )。输入数据长度记为  $L$ ,滑动时间窗口长度记为  $S$ ,截得子序列个数记为  $N(N=L/S)$ 。

将所有子序列  $x_i$  与  $y_j$  作为项目,同一时段截取的子序列组成项目集,所有项目集组成完整事物集。根据确定的最小支持度和最小置信度,筛选出支持度大于最小支持度的频繁项集,置信度大于最小置信度的作为关联规则,记为  $x_i \Rightarrow y_j$ 。单条规则的支持度和置信度计算公式如下:

$$\text{sup}(x_i \Rightarrow y_j) = \frac{n(x_i, y_j)}{D} \quad (1)$$

$$\text{con}(x_i \Rightarrow y_j) = \frac{n(x_i, y_j)}{n(x_i)} \quad (2)$$

式中: $\text{sup}(x_i \Rightarrow y_j)$  为单条规则的支持度; $\text{con}(x_i \Rightarrow y_j)$  为单条规则的置信度; $n(\cdot)$  为项目出现的次数; $D$  为项目集个数。

在 Apriori 算法的基础上,计算序列间关联度和

置信度<sup>[12]</sup>,找出  $n$  条满足关联规则要求的规则  $x_i \Rightarrow y_j$ ,序列间支持度和置信度计算公式如下:

$$\text{sup}(X \Rightarrow Y) = \sum_{i=0}^n \text{sup}(x_i \Rightarrow y_i) \quad (3)$$

$$\text{con}(X \Rightarrow Y) = \sum_{i=0}^n \text{sup}(x_i \Rightarrow y_i) \text{con}(x_i \Rightarrow y_i) \quad (4)$$

式中: $\text{sup}(X \Rightarrow Y)$  为序列间支持度; $\text{con}(X \Rightarrow Y)$  为序列间置信度。关联度和置信度大于阈值时,认定序列具有强关联性。

将完成关联分析的序列输入 DBSCAN 算法进行异常值识别,强关联序列,将位移序列与环境量同时进行粗差识别;弱关联序列,将位移序列进行粗差识别。以某数据点为圆心, $\varepsilon$  为半径画圆,圆内存在不少于  $M$  个数据点,将这些数据点与其密度相连点形成一簇,并被标记,没有被标记的点为噪音点。具体过程为:①假设核心对象  $q$  的  $\varepsilon$  邻域存在点  $p$ ,则  $p$  到  $q$  直接密度可达;②假设存在一个数据链  $p_1, p_2, \dots, p_n, p_1 = q, p_n = p$ ,点  $p_{i+1}$  到点  $p_i$  直接密度可达,则称点  $p$  到点  $q$  密度可达;③假设数据集中一点  $w$ ,如果点  $p_1$  和点  $q_1$  到点  $w$  都为密度可达,则称点  $p$  与点  $q$  密度相连。依次标记,将数据点分为正常点和噪音点,如图 1 所示。两点之间的距离用欧氏距离来表示。

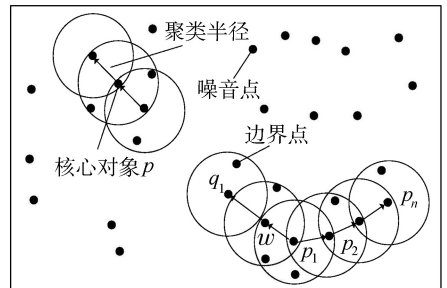
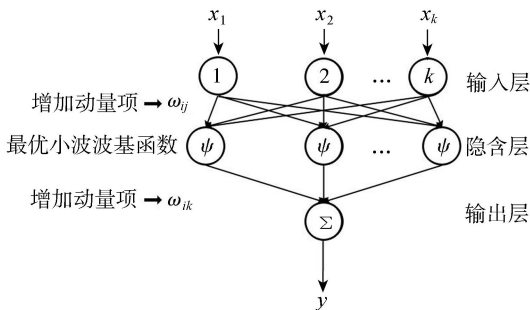


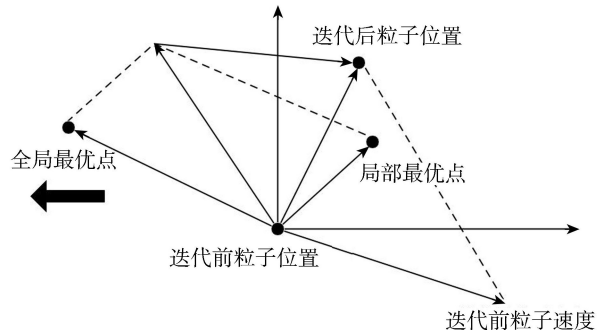
图 1 DBSCAN 算法示意图

### 1.2 改进的小波神经网络

小波神经网络由输入层、输出层和隐含层 3 部分组成,采用小波基函数作为 BP 神经网络的激励函数,具有较强的逼近和容错能力<sup>[13]</sup>,如图 2 所示,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  为小波神经网络的输入参数,  $k$  为影响



(a) 小波神经网络



(b) 改进粒子群算法

图 2 采用粒子群改进的小波神经网络结构

因子的个数,  $y$  为小波神经网络的输出参数, 为大坝效应量。

隐含层节点输出计算公式:

$$h_j = h\left(\frac{\sum_{i=1}^k \omega_{ij} x_i - b_j}{a_j}\right) \quad (j = 1, 2, \dots, K) \quad (5)$$

式中:  $h_j$  为隐含层第  $j$  个节点输出值;  $\omega_{ij}$  为输入层和隐含层的连接权重;  $h(\cdot)$  为小波基函数;  $b_j$  为小波基函数  $h_j$  的平移因子;  $a_j$  为小波基函数  $h_j$  的伸缩因子;  $k$  为粒子数;  $K$  为隐含层节点数。

输出层计算公式:

$$y_k = \sum_{j=1}^K \omega_{jk} h_j \quad (6)$$

式中  $\omega_{jk}$  为隐含层到输出层的连接权重。

由于小波神经网络对隐含层个数十分敏感, 本文采用粒子群算法<sup>[14]</sup>寻找最优隐含层个数。粒子群算法是一种全局搜索算法, 通过寻找局部最优值和全局最优值来更新各粒子的位置和速度, 最终获得最优点。粒子群算法粒子位置和速度更新公式如下:

$$v_{i,m+1} = \omega v_{i,m} + c_1 r_1 (p_i - x_{i,m}) + c_2 r_2 (g - x_{i,m}) \quad (7)$$

$$x_{i,m+1} = x_{i,m} + v_{i,m+1} \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为惯性权重;  $c_1, c_2$  为加速常数;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  的随机数;  $v$  为粒子速度;  $x$  为粒子位置;  $p_i$  为第  $i$  个粒子最佳位置;  $g$  为全局最佳位置;  $m$  为迭代次数。

为解决粒子群容易陷入局部最优的缺陷, 本文提出将惯性权重用非线性权重函数代替, 并应用粒子位置更新公式, 这样可以有效提高全局搜索范围, 避免陷入局部最优。同时, 引入全局最优和局部最优的线性组合, 解决标准粒子群算法搜索范围小的

问题。改进后的粒子群更新公式如下:

$$v_{i,m+1} = \omega(m) v_{i,m} + c_1 r_1 \left(\frac{p_i + g}{2} - x_{i,m}\right) + c_2 r_2 \left(\frac{p_i - g}{2} - x_{i,m}\right) \quad (9)$$

$$x_{i,m+1} = \omega(m) x_{i,m} + [1 - \omega(m)] v_{i,m+1} \quad (10)$$

式中  $\omega(m)$  为关于迭代次数递减的权重函数, 且  $\omega(m) \in [0, 1]$ , 计算公式为

$$\omega(m) = \omega_1 - \frac{(\omega_1 - \omega_2) m}{M} \quad (11)$$

式中:  $\omega_1$  为最大权重;  $\omega_2$  为最小权重;  $M$  为最大迭代次数。

将小波神经网络训练的均方根误差作为粒子群算法的适应度函数, 将隐含层个数作为粒子所处位置, 寻找最优隐含层个数使得训练误差最小。

为避免梯度学习方法使得算法进化缓慢, 采用增加动量项<sup>[15]</sup>提高网络学习效率。根据预测误差  $e$  修正小波神经网络权重  $\omega_{ij}$  和小波基函数系数  $a_j, b_j$ , 加入增加动量项的公式如下:

$$\omega_{ij,m+1} = \omega_{ij,m} + \Delta\omega_{ij,m+1} + l(\omega_{ij,m} - \omega_{ij,m-1}) \quad (12)$$

$$a_{j,m+1} = a_{j,m} + \Delta a_{j,m+1} + l(a_{j,m} - a_{j,m-1}) \quad (13)$$

$$b_{j,m+1} = b_{j,m} + \Delta b_{j,m+1} + l(b_{j,m} - b_{j,m-1}) \quad (14)$$

其中  $\Delta\omega_{ij,m+1} = -\eta \frac{\partial e}{\partial \omega_{ij,m}}$

$$\Delta a_{j,m+1} = -\eta \frac{\partial e}{\partial a_{j,m}} \quad \Delta b_{j,m+1} = -\eta \frac{\partial e}{\partial b_{j,m}}$$

式中:  $\Delta\omega_{ij,m+1}, \Delta a_{j,m+1}, \Delta b_{j,m+1}$  为根据网络预测误差  $e$  计算得到的增加动量项;  $\eta$  为学习速率;  $l$  为输出参数个数。

### 1.3 异常监测数据识别和重构流程

异常监测数据识别和重构流程(图3)如下:

步骤1 对位移实测序列  $X$  和水位实测序列  $Y$

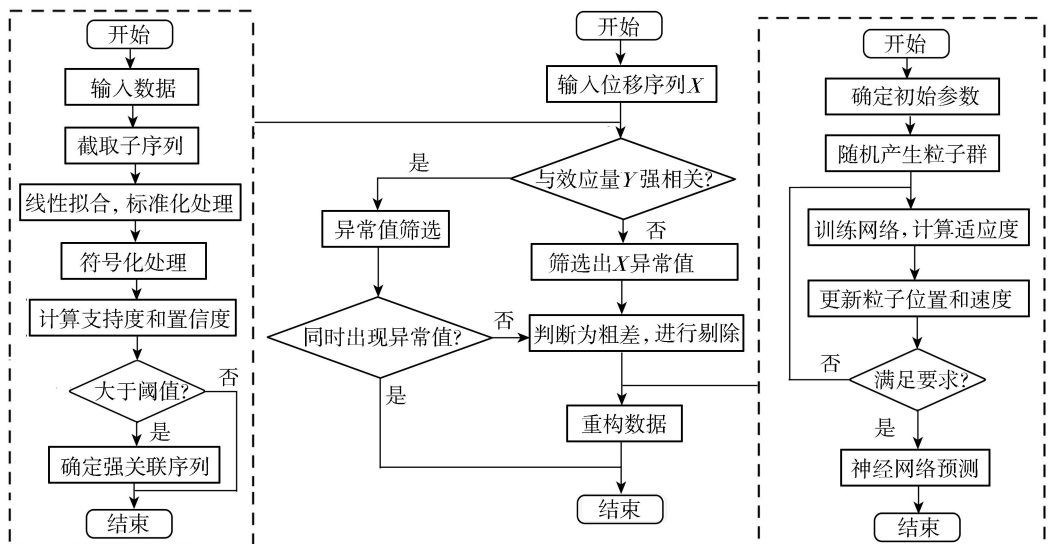


图3 异常监测数据识别和重构流程

进行预处理,运用 Apriori 算法分析两者之间的关联程度。

**步骤 2** 对于与环境变量弱关联的监测数据,运用 DBSCAN 算法对位移序列筛选出异常点,判定为粗差,进入步骤 4 进行数据重构。

**步骤 3** 对于与环境变量强关联监测数据,将位移序列和环境量输入 DBSCAN 算法,若这两组序列同时出现异常点,不予剔除;若只有位移实测序列出现异常点,予以剔除,进入步骤 4 进行重构。

**步骤 4** 将判定为粗差的实测数据剔除,运用改进的小波神经网络算法对该数据点进行重构,补齐被剔除的数据,保证监测序列的完整性。

## 2 模型验证

某混凝土拱坝位于雅砻江下游河段,选取该拱坝 PL1、PL2、PL3 3 个测点,检验本文提出的异常数据识别与重构模型的有效性。

### 2.1 关联性分析

选取 PL1、PL2 两测点 2013 年 6 月 16 日至 2015 年 9 月 28 日每天采集的数据。数据长度  $L=830$ ,设置滑动时间窗口长度  $S=10$ ,截得子序列个数  $N=83$ 。图 4 和图 5 分别为原始数据和子序列拟合斜率归一化分布情况。

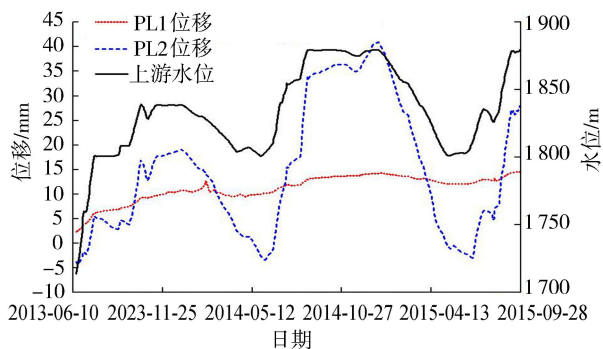


图 4 上游水位与 PL1、PL2 测点原始数据

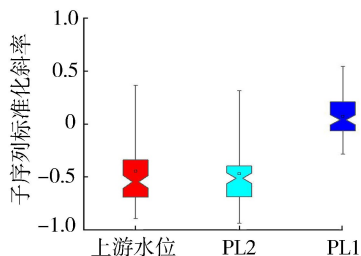


图 5 上游水位与 PL1、PL2 子序列斜率分布

由图 5 可判断上游水位和 PL2 子序列斜率分布类似,上四分位数、下四分位数和中位数相接近,中位数分布在  $-0.5$  左右,PL1 与两者相差较大,中位数分布在  $0$  左右。根据上述原理,对上游水位序列与两测点序列进行关联性分析,设定子序列最小支

持度和最小置信度分别为  $0.3$  和  $0.5$ ,得到子序列的频繁项集以及关联规则的置信度,见表 1。

表 1 上游水位与 PL2 测点子序列频繁项集支持度与置信度

频繁项集	支持度	置信度
$x_1 \Rightarrow y_1$	0.31	0.96
$x_2 \Rightarrow y_2$	0.41	0.83

取序列支持度和置信度的阈值分别为  $0.5$  和  $0.5$ 。计算得水位与 PL2 测点序列间支持度为  $0.71$ ,置信度为  $0.895$ ,则满足阈值要求,认为上游水位与 PL2 测值具有强关联性。上游水位与 PL1 测点没有发现频繁项集,则为弱关联序列。

考虑温度与位移序列的关联性。坝体温度已达到准稳定温度场,利用谐波因子代替实测温度序列,分别考虑正弦谐波  $\sin \frac{2\pi t}{365}$  和余弦谐波  $\cos \frac{2\pi t}{365}$  与位移序列的关联程度,其中  $t$  为监测日至始测日的累计天数。结果显示未发现频繁项集,谐波序列与位移序列为弱关联序列。

### 2.2 弱关联监测数据重构

选取 PL1 测点 2013 年 6 月 16 日至 2015 年 9 月 28 日的监测数据,共 835 个数据,上文已经确定为弱关联序列。为了验证聚类算法对检测异常数据的有效性,人为在 100 ~ 105 个数据中加入高斯白噪声,以及在第 400 和第 500 个数据处加入异常。

将加入噪声的数据运用 DBSCAN 算法进行聚类分析,得出的异常点判定为粗差进行重构。聚类分析结果如图 6 所示,可以看出人为插入的异常点都被标识出来了。

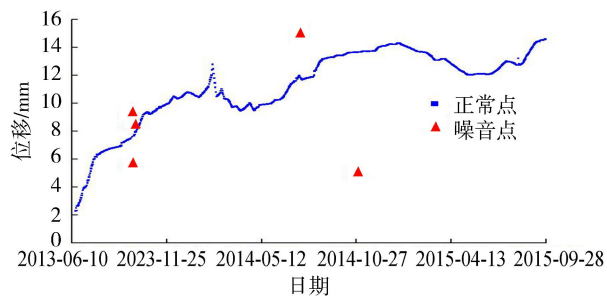
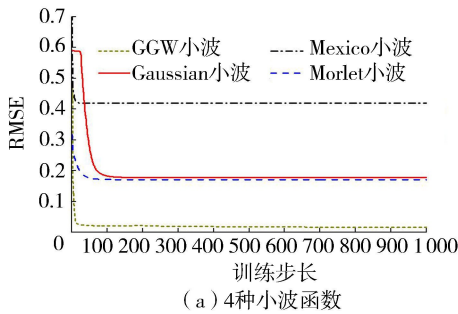


图 6 聚类分析结果

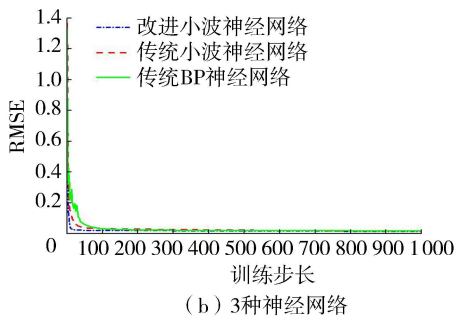
由聚类分析结果得到数据异常点,根据数据清洗规则,剔除粗差点,并运用改进的小波神经网络进行重构数据。采用均方根误差 RMSE 和总误差判断神经网络训练效果。

采用影响因子集作为神经网络的输入层,以相应位移值作为输出层,训练神经网络。选择 Morlet 小波、Mexico 小波、Gaussian 小波和 GGW 小波 4 种不同的小波基函数进行预测,对比各自精度选择最佳激励函数。比较 4 种小波基函数的训练 RMSE 如

图 7(a) 所示,GGW 小波的训练误差比其他小波都要小,则选择 GGW 小波进行下一步预测。设定粒子群个数 30,迭代 20 次,得到最优隐含层个数为 15 个。为了验证改进小波神经网络的优越性,将改进小波神经网络、传统小波神经网络以及传统 BP 神经网络<sup>[16]</sup> 进行对比,3 种神经网络训练误差的 RMSE 见图 7(b),训练 100 步内改进小波神经网络具有更高的精度,超过 100 步 3 种神经网络的精度大致相同。预测结果及误差如表 2 所示,可以得出改进小波神经网络的预测总体误差达到 1.14%,小于其他两种神经网络的误差,具有更低的预测误差。



(a) 4种小波函数



(b) 3种神经网络

图 7 小波函数和神经网络训练的 RMSE

表 2 3 种神经网络预测结果与误差

神经网络	数据点	实际值	预测值	点误差/%	总体预测误差/%	隐含层节点
传统 BP 神经网络	100	7.48	7.42	6.8	7.48	15
	102	7.56	7.47	8.7		
	104	7.61	7.49	11.9		
	400	11.92	11.86	6.0		
	500	13.66	13.62	4.0		
传统小波神经网络	100	7.48	7.44	4.4	5.24	20
	102	7.56	7.51	5.0		
	104	7.61	7.69	7.9		
	400	11.92	11.85	6.3		
	500	13.66	13.63	2.6		
改进小波神经网络	100	7.48	7.48	0.2	1.14	24
	102	7.56	7.58	2.1		
	104	7.61	7.61	0.4		
	400	11.92	11.94	2.0		
	500	13.66	13.67	1.0		

经过数据重构得到新序列如图 8 所示,可见经过数据重构得到的序列更加平滑。

### 2.3 强关联监测数据重构

将上游水位与 PL3 测点(图 9)进行关联性分

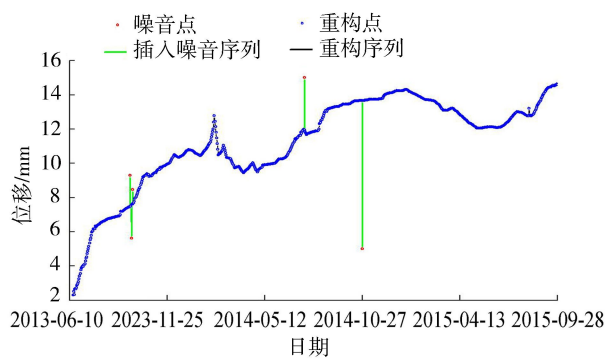


图 8 数据重构前后的序列

析,得到频繁项集为  $x_2 \Rightarrow y_2$ ,置信度为 0.878,则两序列为强关联序列。将序列输入 DBSCAN 算法进行异常值检测,检测在 2014 年 2 月 14 日、2014 年 7 月 24 日和 2015 年 8 月 10 日出现异常点,对比上游水位的原始数据,将这些异常数据进行分类,再将归为粗差的数据进行剔除重构。

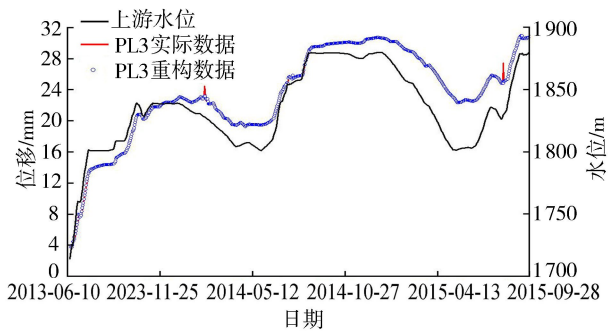


图 9 强关联序列重构结果

观察到上游水位在 2014 年 7 月 16 日存在突出尖点,考虑环境变量作用于结构的滞后性,可以判定 2014 年 7 月 24 日的为反映大坝性态点,不予剔除。对比上游水位原始数据,在另外两个异常点出现时刻未出现数据异常,则认为此两异常点为粗差,予以剔除。将数据输入改进小波神经网络,输出预测值重构监测数据。2014 年 2 月 14 日和 2015 年 8 月 10 日两个数据点重构数据分别为 23.19 mm 和 24.79 mm,其实际数据为 24.45 mm 和 26.41 mm,重构后序列如图 9 所示。结果显示所建模型可以将异常数据分为粗差与反映大坝性态点,准确剔除粗差,保留有用点。

### 3 结 语

本文建立了大坝变形监测异常数据识别和重构模型,通过 Apriori 算法解析了位移与环境量的关联性,并通过改进粒子群算法优化小波神经网络,消除了原始数据粗差的影响。某拱坝实测数据验证结果表明,在关联性分析的基础上,可以准确找出粗差点位置,同时提出的重构模型可以得到更为合适的重构点,为大坝变形监测数据异常识别与重构提供了

新的方法。

## 参考文献:

- [1] 丛培江. 大坝监测数据异常值的概率识别法[J]. 水电能源科学, 2005(4): 32-34. (CONG Peiji. Probabilistic method to identify abnormal values of dam monitoring data[J]. Hydroelectric Energy, 2005(4): 32-34. (in Chinese))
- [2] 花胜强, 李永红, 高磊, 等. 基于离差和改进的大坝变形监测粗差判别方法[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 67-69. (HUA Shengqiang, LI Yonghong, GAO Lei, et al. A gross error discriminant method based on difference squares in dam displacement monitoring [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(6): 67-69. (in Chinese))
- [3] 赵泽鹏, 陈建康, 张瀚, 等. 基于稳健估计的大坝监测数据粗差识别方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(12): 68-71. (ZHAO Zepeng, CHEN Jiankang, ZHANG Han, et al. The method for gross error identification of dam monitoring data based on robust estimation[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(12): 68-71. (in Chinese))
- [4] 王丽蓉, 郑东健. 基于卷积神经网络的大坝安全监测数据异常识别[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 72-77. (WANG Lirong, ZHENG Dongjian. Anomaly identification of dam safety monitoring data based on convolutional neural network [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 72-77. (in Chinese))
- [5] 赵新华, 范振东, 何宇, 等. 基于数据重构与孤立森林法的大坝自动化监测数据异常检测方法[J]. 中国农村水利水电, 2021(9): 174-178. (ZHAO Xinhua, FAN Zhendong, HE Yu, et al. An anomaly detection method for dam automatic monitoring data based on data reconstruction and isolated forest [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(9): 174-178. (in Chinese))
- [6] 蒋齐嘉, 蒋中明, 唐栋, 等. 基于 SSA-DBSCAN 的边坡安全监测数据粗差探测方法研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 85-90. (JIANG Qijia, JIANG Zhongming, TANG Dong, et al. The gross error detection of slope safety monitoring data based on SSA-DBSCAN [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 85-90. (in Chinese))
- [7] 黄成章, 顾冲时, 何菁. 混凝土坝变形监测缺失数据处理新方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 89-94. (HUANG Chengzhang, GU Chongshi, HE Jing. A novel method for processing missing data of concrete dam deformation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 89-94. (in Chinese))
- [8] 徐初, 苏怀智, 杨立夫. 基于 GP-XGBoost 的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5): 41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))
- [9] 欧斌, 吴邦彬, 袁杰, 等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 21-26. (in Chinese))
- [10] 周兰庭, 柳志坤. 大坝变形实测数据的多重分形特征解析方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 18-24. (ZHOU Lanting, LIU Zhikun. Multifractal feature analysis method for measured data of dam deformation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 18-24. (in Chinese))
- [11] 李俊, 苏怀智, 周仁练. 基于关联规则的土石坝渗流推理预测方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 89-94. (LI Jun, SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Seepage prediction method based on association rules and its application to earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5): 89-94. (in Chinese))
- [12] 徐搏超. 基于参数关联性的电站参数异常点清洗方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 142-147. (XU Bochao. Parameter correlation based parameter abnormal point cleaning method for power station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 142-147. (in Chinese))
- [13] 钱建国, 樊意广. 基于改进小波神经网络的 GPS 高程拟合研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(3): 253-257. (QIAN Jianguo, FAN Yiguang. Research on GPS height fitting based on improved wavelet neural network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(3): 253-257. (in Chinese))
- [14] 牛景太. 基于奇异谱分析与 PSO 优化 SVM 的混凝土坝变形监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 60-65. (NIU Jingtai. Dam deformation monitoring model based on singular spectrum analysis and SVM optimized by PSO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 60-65. (in Chinese))
- [15] GRAF R, ZHU Senlin, SIVAKUMAR B. Forecasting river water temperature time series using a wavelet-neural network hybrid modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124115.
- [16] 田正宏, 苏伟豪, 郑祥, 等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 81-86. (TIAN Zhenghong, SU Weihao, ZHENG Xiang, et al. Real-time evaluation method of compaction degree for roller-compacted concrete based on GA-BP neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-04-03 编辑: 俞云利)

## 《水利水电科技进展》征稿简则

- 1 本刊是一份科学技术期刊 (ISSN 1006-7647; CN 32-1439 / TV), 主要反映国内外水资源开发、利用、配置、节约和保护领域的科技进展和动态, 为我国水利水电工程建设及运行管理服务。主要读者对象为水利水电及相关学科的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员和大专院校师生。本刊逢单月出版, 国内外公开发行, 邮发代号: 28-244。
- 2 本刊主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境、水管理等有关的科技论文, 设有研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目。本刊优先发表自然科学基金资助项目及其他重大科技项目的研究(技术)论文。
- 3 本刊已入选《中国科学引文数据库》《万方数据数字化期刊全文数据库》《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》等数据库或网站。作者投稿时如无特别声明即被视为同意本刊通过上述媒体为读者提供服务; 如有异议, 请在投稿时说明。
- 4 来稿要求和注意事项
  - (1) 文稿务求内容正确, 应注重技术创新或学术创见; 重点突出作者论文的新贡献; 要求文字精练, 结构严谨, 数据可靠(重要数据请注明出处); 避免写成报告、讲义和学位论文的缩写形式。文稿内容不能泄露国家秘密, 在政治或涉外问题上符合国家政策。
  - (2) 文稿篇幅 4 000~6 000 字为宜, 应提供中英文篇名、作者姓名及单位名称, 并编写中英文摘要(约 250 个汉字)和关键词(4~6 个)。简讯类文稿一般不超过 800 字。
  - (3) 文稿请用 A4 篇幅, 正文用 5 号字通栏排版; 编译稿应尊重原文的版权, 注明原文出处(附外文原文或原文复印件)。计量单位一律使用法定计量单位。
  - (4) 文稿中的图表应设计合理, 大小适当。请使用三线表。图表应排在正文引用处, 先文后图表。
  - (5) 参考文献择作者亲自阅读、本文引用、公开发表或有案可查者列出, 采用顺序编码制。中文期刊文献必须用中英文两种文字著录。常用著录格式(常用参考文献类型: 期刊文章 [J]; 专著 [M]; 会议论文集 [C]; 学位论文 [D]; 标准 [S]; 报告 [R]; 报纸 [N]; 专利 [P]; 电子文献 [EB/OL]):
    - [1] 作者名(外文姓前名后). 论文篇名 [J]. 期刊名, 年份, 卷号(期次): 起止页码.
    - [2] 编著者(外文姓前名后). 书名 [M]. 版次. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
    - [3] 作者. 题名 [C] // 文集编者. 文集名. 出版地: 出版者, 出版年: 论文起止页码.
    - [4] 作者. 学位论文名 [D]. 地名(城市名): 学位授予单位, 年份.
    - [5] 作者. 报告名 [R]. 收藏地(城市名): 收藏单位, 年份.
    - [6] 作者. 题名 [EB/OL]. [引用日期]. 获取和访问路径.
  - (6) 摄影作品以水利水电工程为主题, 要求照片清晰、层次丰富, 彩照, 并附简短说明。
  - (7) 来稿请写明作者姓名、出生年、性别、职称、学位、主要研究方向(或从事的工作)、工作单位全称、邮政编码、通信地址、联系电话及电邮地址。
- 5 作者投稿, 文责自负, 本刊只对稿件作文字上的修改。请勿一稿多投。作者投稿满 3 个月未收到本刊编辑部通知者, 可将稿件另行处理。
- 6 本刊对录用发表的文章将按与作者约定的稿酬标准支付稿酬。所付稿酬包括本简则第 3 条所列媒体的著作权使用费; 同时向作者赠送当期样刊。
- 7 本刊对录用发表的文章酌收论文发表费, 论文发表费在论文被录用后交纳。另有约定的除外。
- 8 本刊只接受网上投稿, 网络地址: <http://jour.hhu.edu.cn>。  
编辑热线: 025-83786335; E-mail: [jz@hhu.edu.cn](mailto:jz@hhu.edu.cn) 或 [jz1981@vip.163.com](mailto:jz1981@vip.163.com)。  
微信公众号: “水利水电科技进展”或“slsdkjjz”。



一滴清水 一片绿地 一个地球



ISSN 1006-7647



9 771006 764234