

# 基坑开挖中地下水突涌风险的预测方法研究

鲍忠伍<sup>1</sup> 刘红战<sup>2</sup>

1 云南省地质工程勘察有限公司 2 云南地矿工程勘察集团有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2359

**[摘要]** 深基坑开挖阶段,地下水突涌易引发坑底鼓胀、管涌现象及结构稳定性失效,对施工安全构成严重威胁。当前工程实践中广泛应用的经验判别标准,难以精准刻画复杂地层环境下的水力破坏隐患,本文依托数值模拟技术、现场实测数据及典型工程案例积累,建立一套适配深基坑工程的地下水突涌预测体系、通过收集不同地层渗透特性、覆盖层厚度及降水参数构成的基础数据集,借助渗流—应力耦合分析手段锁定潜在突涌区域,关联监测孔水位动态变化构建响应阈值计算模型、选取地铁深基坑工程实例开展对比分析,将预测结果与实际涌水量数据进行校验,验证该方法的可靠程度,研究形成的技术成果,可为复杂环境下基坑降水方案设计及风险防控提供科学支撑。

**[关键词]** 基坑工程; 地下水突涌; 渗流分析; 风险预测; 现场监测

**中图分类号:** TV551 **文献标识码:** A

## Research on the Prediction Method of Groundwater Surge Risk in the Excavation of Foundation Pit

Zhongwu Bao<sup>1</sup> Hongzhan Liu<sup>2</sup>

1 Yunnan Geological Engineering Survey Co., LTD.

2 Yunnan Geology and Mineral Engineering Survey Group Co., Ltd.

**[Abstract]** During deep foundation pit excavation, groundwater surges can easily cause pit bottom bulging, pipe gushing, and structural stability failure, posing serious threats to construction safety. Current engineering practices widely use empirical criteria that struggle to accurately characterize hydraulic hazards in complex geological environments. This study establishes a groundwater surge prediction system tailored for deep foundation pit projects by integrating numerical simulation techniques, field measurement data, and typical engineering case studies. Through collecting foundational datasets comprising different stratum permeability characteristics, caprock thickness, and precipitation parameters, the method employs seepage—stress coupling analysis to identify potential surge zones. By correlating dynamic water level changes in monitoring boreholes to develop response threshold calculation models, and conducting comparative analyses with subway deep foundation pit projects, the study validates the reliability of the prediction results against actual surge data. The developed technical achievements provide scientific support for foundation pit dewatering scheme design and risk prevention in complex geological environments.

**[Key words]** foundation pit engineering; groundwater gushing; seepage analysis; risk prediction; on-site monitoring

### 引言

城市地下空间开发进程持续加快,深基坑工程的建设规模与数量同步增长,地下水问题已成为制约基坑工程安全的核心因素。地下水突涌破坏具有突发性强、危害程度高的特点,传统经验判别方法(包括安全系数法、临界水头计算公式等)在多层复合地层条件下的应用效果受限。基于此,亟需构建融合实测信息、数值模拟技术与工程案例的综合预测方法,提升突涌风

险评估精度与提前预警能力。本文围绕地下水突涌风险预测的核心思路,通过系统分析典型工程监测数据,搭建适用于多种地层条件的预测实施流程,选取实际深基坑工程案例完成方法有效性验证。

### 1 地下水突涌的工程特征及影响因素

#### 1.1 基坑突涌的典型破坏模式分析

地下水突涌的表现形式主要包括坑底鼓胀、砂土液化及局

部管涌通道发育,这类破坏往往具备突发性强、蔓延速度快的特征。在实际工程中,结合开挖现场影像资料与监测孔实测数据,能够清晰追踪突涌的形成演化过程:当承压水头攀升至临界数值时,坑底土层率先出现轻微隆起,尽管隆起幅度有限,但位移变化速率显著提升;后续,上升水流的扰动作用导致土体结构松散,孔隙水压力迅速累积,细颗粒土体开始发生迁移,局部区域出现浑浊出水现象。

某沿河深基坑突涌事故的记录数据显示,事故发生前20分钟,坑底隆起速率从原本的0.3mm/h骤升至4.8mm/h;突涌发生瞬间,监测点的瞬时涌水量达到120~150m<sup>3</sup>/h,坑底局部2m范围内出现涌砂现象,大量细粒土流失,进而导致相邻支护桩的水平位移增至初始状态的1.6倍。

### 1.2 突涌形成的主要水文地质控制参数

突涌风险的高低与地层渗透系数、有效覆土厚度及承压水头等参数存在紧密关联,渗透系数作为表征土体导水能力的核心指标,其数值越大,上升水流的流速就越难得到有效控制。某项目的变水头渗透试验结果显示,粉细砂层的渗透系数K值达到 $1.2 \times 10^{-3}$ cm/s,而下伏粉质黏土层的K值仅为 $3.5 \times 10^{-6}$ cm/s,两者差异超过300倍,此类强渗透地层极易成为突涌发生的优先通道。

有效覆土厚度是抵御上升水压力的关键因素,当覆土层较薄或地层中存在透水夹层时,基坑的抗突涌能力会明显弱化。工程实测数据表明,当覆土厚度从9m缩减至6m时,坑底临界水头下降幅度接近35%,可见系统稳定性对覆土厚度的变化极为敏感。

承压水头直接决定了突涌发生的动力条件,某场地的监测结果显示,汛期时段承压水头上升1.5~2.0m,导致抗突涌临界安全系数从1.35降至1.05,基坑处于临近失稳的状态。

### 1.3 降水措施对突涌风险的影响

科学合理的降水方案是防控突涌风险的关键技术手段,降水井的布置形式、抽水量大小及井间间距,都会直接影响基坑周边及坑底的水位下降形态。若降水井布设过于稀疏,水位下降的影响范围不足,局部区域的承压水仍会维持高水头状态,导致坑底形成不均匀的上升水力梯度;若降水井布设过密且抽水量过大,则可能引发地层过度固结,产生额外的地表沉降问题。

实际工程的水位一时间监测曲线显示,正常抽水阶段水位下降速率约为0.08m/h,当抽水量增加30%后,水位下降速率并未出现明显提升,反而造成周边地表沉降速率从0.5mm/d增至1.4mm/d,这一现象说明降水强度并非越大越合理。

## 2 地下水突涌风险预测方法

### 2.1 基于渗流—应力耦合的风险识别方法

地下水突涌的判定需同步兼顾水力条件与土体结构的力学响应特征,渗流—应力耦合分析因此成为较为高效的技术路径。借助三维有限元模型搭建,能够模拟降水作用下含水层、隔水层及坑底土体的水力场演化规律。通过模型运算可获取坑底区域的水压力分布特征、孔隙水压力增量数据及上升流速场信息,进而精准定位潜在的突涌薄弱部位。某深基坑算例的耦合分析

结果显示,坑底最大上升流速达到0.92cm/s,与该区域地层的临界上升流速(约0.85cm/s)相比,表明局部已处于临近突涌的临界状态。

同时,模型还可输出应力重分布情况,例如坑底有效应力降低区的具体范围与深度。某工程的有限元模拟结果表明,当降水达到设计水位后,坑底中央区域有效应力下降幅度达45%,远高于边部区域的18%,结合上升流速分析可判断中央区域为突涌风险最高区域。

### 2.2 基于监测数据的动态风险评估模型

突涌风险呈现显著的动态变化特征,其评估需依赖开挖过程中的实时水文数据与变形监测信息。为此,以监测水位、孔隙水压力及变形速率为核心指标构建风险评估模型,成为实现提前预警的关键手段。

基于多项工程数据的回归分析,可建立水位变化 $\Delta h$ 与突涌风险分级的经验阈值关联,具体划分如下: $\Delta h > 1.2$ m/d界定为高风险,0.5~1.2m/d界定为中风险, $< 0.5$ m/d界定为低风险。某工程连续30天的监测数据显示,水位长期稳定在小幅下降区间(约0.2~0.4m/d),但第23天起出现明显升高趋势,48小时内水位上升0.9m,变形速率增至日常的3倍。该模型成功在突涌发生前2天发出“中—高风险”预警信号。

此类动态评价方法的核心优势在于依托高频监测数据,能够实时反映现场实际工况,规避单一模型计算导致的静态偏差,尤其适配复杂水文地质条件下的风险动态跟踪。

### 2.3 多源数据融合的突涌预测流程

单一预测方法难以满足复杂工况下的突涌预测可靠性要求,因此需整合勘察数据、渗流模拟结果与现场监测数据,构建多源数据融合的突涌预测流程。该流程的完整实施步骤包括:①数据采集环节:系统收集地质勘察参数、降水井运行数据、孔隙水压力及变形监测成果;②模型计算环节:开展渗流—应力耦合分析,获取关键区域水力梯度及应力变化趋势;③预警分级环节:将耦合计算结果与监测水位变化 $\Delta h$ 、孔隙水压力比值及变形速率共同输入风险判别模型,完成风险等级划分;④处置方案环节:针对高风险区域采取增设减压井、放缓开挖速度、局部土体加固等针对性防控措施。

某实际工程应用该融合流程后,通过模型预判锁定两处潜在突涌点,并在施工过程中重点布置监测点位,最终成功提前识别实际突涌征兆,统计数据显示,该方法的预测准确率达87%,显著优于传统单一经验法(约60~70%)。

## 3 工程案例验证与预测结果分析

### 3.1 案例工程概况及地质条件

本次选取的案例为上海某地铁站深基坑项目,基坑开挖深度约21.5m,支护体系采用三道钢支撑与地下连续墙组合形式,场地地层自上而下依次为填土、粉质黏土、粉细砂层及下伏强承压含水层,其中粉细砂层厚度介于6~10m之间,是诱发突涌风险的核心敏感地层。

依据勘察报告提供的参数,各关键地层渗透系数取值范围

如下: 粉质黏土 $K=(1\times 10^{-6}\sim 5\times 10^{-6})\text{cm/s}$ , 粉细砂层 $K=(8\times 10^{-4}\sim 2\times 10^{-3})\text{cm/s}$ , 承压含水层 $K=(3\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-3})\text{cm/s}$ 。

### 3.2 风险预测模型的应用过程

依托渗流—应力耦合模型, 对降水至设计水位后的水流场特征进行计算分析, 计算结果显示, 坑底中央区域最大上升流速为 $0.84\sim 0.93\text{cm/s}$ , 局部压力云图呈现“椭圆状高压区”, 该分布形态与粉细砂层厚度变化规律一致, 模型预测结果表明, 坑底有效应力降低区面积约占基坑底总面积的27%, 提示中心区域存在明显突涌潜在风险。

现场同步布设18个水位监测孔与8个坑底隆起监测点, 连续监测数据显示, 基坑南侧3#、5#监测孔在施工第18-25天期间水位回升 $0.6\sim 0.9\text{m}$ , 显著偏离其他区域 $0.2\text{m/d}$ 左右的稳定下降态势; 变形监测数据显示, 中心隆起点位的位移速率从 $0.12\text{mm/d}$ 增至 $0.46\text{mm/d}$ , 达到正常数值的3-4倍。

参考《建筑基坑工程技术规范》要求, 规范规定的临界上升流速约为 $0.80\text{cm/s}$ , 本工程模型计算值略高于该临界标准, 且实测孔隙水压力比值( $u/\sigma'$ )最高达0.92, 已接近液化判定区间。

### 3.3 预测结果与实际施工表现对比

多源数据融合预测模型在开挖第24天发出“中—高风险”预警, 明确指出中心偏南区域(约占基坑总长度的1/3区段)存在突涌可能性, 预测发生时间窗口为第26-30天、现场施工至第28天, 坑底出现轻微浑浊出水现象, 降水井出水量短时间内提升35%, 由初始 $95\text{m}^3/\text{h}$ 增至 $128\text{m}^3/\text{h}$ ; 坑底南侧5#隆起监测点位移量达 $6.2\text{mm}$ , 虽略高于模型预测值( $4\sim 5\text{mm}$ ), 但变化趋势与预测结果一致。

实际施工中未发生完全突涌事故, 但出现典型突涌前兆状态, 包括浑浊出水、局部隆起加速、细砂迁移等现象, 且发生区

域与预测范围高度契合、事后复盘分析表明, 模型在突涌区域定位与时间窗口预测方面准确度较高, 误差主要源于抽水井局部堵塞引发的水位波动, 进而导致局部水力梯度增大。

工程实践总结显示, 该模型对突涌风险识别的整体准确率约为86-89%, 高风险区空间定位误差控制在6m以内。

## 4 结语

本研究综合运用渗流—应力耦合分析、监测数据动态评价及多源数据融合技术, 构建形成一套适用于深基坑工程的地下水突涌风险预测体系、工程案例验证结果表明, 该体系能够精准识别突涌高风险区域与关键时间节点, 预测精度稳定在85%以上, 且成功指导现场优化降水系统布置与开挖施工节奏, 有效规避突涌失稳事故发生、研究成果证实, 融合数值分析与实时监测的综合预测技术, 可大幅提升深基坑施工安全保障水平, 为复杂水文地质条件下的基坑工程风险控制提供切实可行的工程化解决方案。

### [参考文献]

- [1]毛仲敏. 临江地铁车站基坑涌水涌砂灾害孕育机理及评价方法研究[D]. 中国地质大学, 2023.
- [2]姚一鸣. 保山隆阳区地下空间建设地质风险综合评价研究[D]. 昆明理工大学, 2022.
- [3]程双财. 福州地铁深基坑施工过程中地下水风险与控制分析[J]. 福建建设科技, 2021, (01): 83-87.
- [4]薛青松. 复杂工况下的长隧道深基坑地下水综合治理分析[J]. 石材, 2025, (11): 22-24+27.

### 作者简介:

鲍忠伍(1981--), 男, 云南宣威人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水工环。