

雷宏军, 武炆, 吕正勋, 等. 蚁巢赋存及库水位升降下土石坝水力破坏机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 183-201. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.015

LEI Hongjun, WU Yang, LYU Zhengxun, et al. Research on the hydrofracturing mechanism of termitarium occurrence in earth-rock dam under changing water levels based on numerical models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 183-201. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.015

蚁巢赋存及库水位升降下土石坝 水力破坏机理研究

雷宏军^{1,2}, 武炆¹, 吕正勋^{2,3}, 潘红卫¹, 何芳婵^{2,3}, 蔡勤学⁴,
屈章彬¹, 严军¹

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 河南省水利工程安全技术重点实验室,
河南 郑州 450003; 3. 河南省水利科技应用中心, 河南 郑州 450003;
4. 黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 济源 459017)

摘要:【目的】白蚁在土石坝内筑巢严重损害了坝体的结构完整性, 其复杂的巢穴结构能够显著改变坝体内部的渗流特性和应力分布。然而, 目前库水位升降下坝体不同部位受到蚁巢影响的具体程度, 尚缺乏明确的认识。【方法】以白龟山水库顺河坝为研究对象, 建立有限元模型, 选取坝体上下游布置六个监测点, 分析不同蚁巢赋存及库水位升降下土石坝内部结构渗流特征、应力变形及稳定性变化规律。【结果】结果表明: (1)在设计洪水水位下, 蚁巢系统对坝体的渗流和稳定性具有显著影响, 这种影响与迎水坡水位和蚁道通风口的位置密切相关, 而与蚁巢本身的位置和尺寸关系相对较小。(2)蚁道的存在造成坝体内部形成渗流通道, 使水流能够迅速通过坝体, 导致坝体浸润线升高, 从而使坝体基质吸力降低, 同时蚁道直径的增加会导致浸润线下降速度变缓, 增加了渗透破坏的风险。(3)蚁巢赋存下坝体孔隙水压力在高水位时增速与峰值均高于无蚁巢情景, 并对水位变化呈现出高敏感性。(4)在位移场方面, 蚁巢系统主要影响坝体蚁巢系统以上的区域, 并随着库水位的升降变形幅度增大或减少。此外蚁巢规模越大, 位移幅度也越大。(5)蚁巢系统的存在削弱了坝体整体稳定性, 导致坝体安全系数降低。相较于蚁巢的位置和尺寸, 水位升降速率对坝体安全系数的影响更为显著。【结论】有限元分析可以有效了解蚁巢系统对土石坝不同部位的水力破坏程度, 揭示库水位升降速率和蚁巢规模对土石坝的水力破坏机理, 快速评估土石坝的安全状况, 为土石坝白蚁危害安全评价提供支撑。

关键词: 蚁巢分布; 水力破坏; 数值模拟; 孔压分布; 稳定性系数; 土石坝

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.015

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV139.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0183-19



与作者互动
听语音
聊科研

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2025-02-07; 录用日期: 2025-03-06; 网络出版日期: 2025-03-20

基金项目: 河南省水利工程安全技术重点实验室开放基金项目(HNAZ202407); 2024年自然灾害防治技术装备工程化攻关专项项目-监测预警和灾害信息获取(TC240HE75-3)

作者简介: 雷宏军(1975—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事堤坝白蚁防治研究。E-mail: leihongjun@ncwu.edu.cn

通信作者: 何芳婵(1984—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利工程安全评价研究。E-mail: 66166485@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Research on the hydrofracturing mechanism of termitarium occurrence in earth-rock dam under changing water levels based on numerical models

LEI Hongjun¹, WU Yang¹, LYU Zhengxun^{2,3}, PAN Hongwei¹, HE Fangchan^{2,3}, CAI Qinxue⁴,
QU Zhangbin¹, YAN Jun¹

(1. China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. Henan Key Laboratory of Hydraulic engineering safety technology, Zhengzhou 450003, Henan, China; 3. Henan Provincial Water Conservancy Technology Application Center, Zhengzhou 450003, Henan, China; 4. Yellow River Water Conservancy and Hydropower Development Group Co., Ltd., Jiyuan 450016, Henan, China)

Abstract: [Objective] Termites nests within earth and rock dams severely damages the integrity of the dam structure. Their complex nest structure under variable water levels can significantly change the seepage characteristics and stress distribution inside the dam body. However, there is a lack of clear understanding of the extent to which different parts of the dam body are affected by the nests. [Methods] Taking the auxiliary dam of Baiguishan Reservoir as an example, six monitoring points were selected upstream and downstream of the dam. Numerical simulations on the damage of termitarium to earth and rock dams were conducted, and the influence on the hydraulic characteristics and stability of the dam were analyzed. [Results] The findings show that: (1) Under design flood level conditions, the termitarium system has a significant impact on the dam's seepage and stability characteristics. This phenomenon is primarily related to the water level on the upstream slope and the location of the termite tunnel ventilation openings, rather than the position and size of the termitarium itself. (2) The presence of termite tunnels creates seepage channels within the dam body, allowing water to flow through the dam more rapidly, which result in an elevated phreatic line. This, in turn, reduces the matric suction of the dam. Additionally, an increase in the diameter of the termite tunnels will slow down the rate at which the phreatic line drops, thereby increasing the risk of seepage failure. (3) When the water level is high, the rate of increase and the peak value of pore water pressure in the dam body are higher under the influence of the termitarium compared to a dam without termitarium. The pore water pressure also shows higher sensitivity to changes in water level. (4) In the displacement field, the termitarium system mainly affects the area above the termitarium within the dam. The displacement amplitude in this area increases during the water level rise and decreases during the water level drop. Moreover, the larger the scale of the termitarium, the greater the displacement amplitude. (5) The termitarium system weakens the overall stability of the dam and leads to a decrease in the safety factor. The impact of the rate of water level rise and fall on the safety factor is more significant than the position and size of the termitarium. [Conclusion] Numerical simulation can effectively diagnose the damage level of earth and rock dams under termite damage and quickly assess the safety condition of termite-hazardous earth and rock dams. This study combines termite damage with earth and rock dam safety evaluation by observing the structural and performance changes of the dam and quantifying the damage caused by termites to the dam, revealing the hydraulic destruction mechanism of the dam termitarium, and providing support for the safety evaluation of earth and rock dams affected by termites.

Keywords: termitarium; hydrofracturing mechanism; numerical simulation; pore pressure distribution; stability coefficient; earth-rock dam

0 引言

白蚁是威胁水利工程安全运行的重要害堤动物^[1], 越是湿热的地方, 白蚁分布越多, 危害也越突出, 其危害性被称为“慢性地震”。我国现有的 9.8 万座水库大坝中 89.9% 是土石坝, 其高堆置的土体、适宜的温湿度以及丰富的食物源, 为白蚁提供了适宜的生存环境^[2]。除设计、施工因素外, 白蚁等动物巢穴也是造成坝体异常渗漏的重要原因。白蚁在土石坝内构筑庞大的蚁巢(主巢)、众多副巢及四通八达的蚁道, 破坏了堤坝结构的完整性^[3], 可造成

渗漏、管涌、沉陷、滑坡等重大险情, 严重的甚至会酿成垮坝。历史上, 白蚁危害曾引起堤坝溃决造成重大损失, 1998 年江西九江段长江堤溃口, 仅在长江中下游地区, 堤坝险情就多达 6 181 处, 这些险情包括管涌、散浸、滑坡、渗漏等多种形式, 其中有 80% 的险情是白蚁隐患造成的^[4]。2004 年舟山市岱山东沙水库发生滑坡事故, 调查结果显示该事故是白蚁巢穴导致堤坝发生了管涌现象进而导致堤坝滑坡^[5]。

近年来, 受全球气候变暖和白蚁繁殖周期规律的影响^[6], 堤坝白蚁活动呈现向北蔓延趋势, 河南省

位于南北气候的过渡地带, 研究人员在河南省境内许多地区如信阳、平顶山、驻马店、南阳等地水库大坝工程均采集到黑翅土白蚁活体^[7]。河南省地跨长江、淮河、黄河、海河四大流域, 目前除海河流域外均发现有白蚁危害^[8]。水利工程白蚁危害具有很强的隐蔽性、反复性、长期性, 是威胁水利工程安全的重大风险隐患, 事关人民群众生命财产安全, 必须采取有力有效措施提高防治工作能力和水平, 确保水利工程安全运行、运行安全^[9]。水利部高度重视白蚁防治工作, 印发实施《水利工程白蚁等害堤动物防治工作实施方案(2024—2030年)》《水利工程白蚁防治工作指导意见》(以下简称《指导意见》)。《指导意见》明确了水利工程白蚁防治应坚持的三条基本原则: 一是以防为主、防治结合; 二是综合治理、持续管控; 三是科技赋能、绿色安全^[10]。但其防治工作仍面临一系列突出难题, 比如白蚁的巢穴结构比较复杂, 坝体内部结构受蚁巢系统的破坏存在差异, 目前尚缺乏精确的方法来评估蚁巢系统对坝体不同部位的具体影响。同时, 堤坝蚁巢系统的水力破坏机理尚且不明, 目前还没有成熟的理论模型对土石坝白蚁危害进行计算, 更缺乏量化危害程度的数学方法。

随着水利工程“坝道医院”“三甲医院”的兴起, 土石坝安全评价逐渐成为水利工程安全技术服务体系的重要内容。大多土石坝事故都是由于异常渗漏引起的, 目前多采用机器学习^[11]和数值模拟^[12-14], 对大坝渗流和整体结构稳定性进行复核计算和安全评价。机器学习为大坝安全评估提供了高效、准确的工具, 能够有效复核计算渗流和结构稳定性, 并为大坝的安全运行提供科学依据。SALAZAR等^[15]探讨了机器学习在大坝安全评估中的应用, 尤其是随机森林、提升回归树、神经网络、支持向量机和多元自适应回归样条等算法在预测大坝位移和渗漏方面的表现。研究发现, 提升回归树在预测准确性方面表现最佳, 其次是神经网络和随机森林。LI等^[16]提出了一种基于机器学习的混凝土坝安全评估新方法, 利用长期监测数据, 通过顺序偏好技术量化安全评分, 并使用神经网络预测未来安全性能, 通过案例研究验证了该方法的有效性。可以发现机器学习具有强大的数据处理和预测能力, 进而对大坝的安全状态进行高效评估。然而模型的构建和优化需要大量的实测数据作为训练基础, 而这些数据的获取往往面临诸多挑战, 例如数据采集成本高昂、数据质量参差不齐以及数据完整性难以保证等。相比之下数值模拟主要通过对大坝的渗流、管涌、塌坑事故风险分析进行精准评价^[17-19],

能够通过合理的假设和参数设定, 较为准确地模拟大坝的渗流特性和整体结构稳定性。LIN等^[20]基于XGBoost和SHAP进行了坝体材料敏感性分析。利用GeoStudio软件对SHAP的敏感性分析结果进行验证, 模拟结果显示, 单位重量、坡角、坡高、孔隙水压力与边坡稳定性呈负相关, 而黏聚力、内摩擦角与边坡稳定性呈正相关。TAO等^[21]为了分析影响古遗址边坡稳定性的主要因素, 利用GeoStudio软件对边坡在地震和降雨作用下的稳定性进行了分析; 张冲等^[22]采用工程地质条件分析、监测资料分析、三维极限平衡分析和数值模拟相结合的研究方法, 对叶巴滩右坝肩变形的边界条件和破坏模式进行深入研究, 揭示了边坡变形开裂成因机制; KUROKAWA等^[23]基于有限差分GENSMAC方法, 利用三维自由流动模拟系统进行了数值计算, 分析了溃坝流和湍流射流垂直撞击平面时数值技术的有效性; 杨鹏等^[24]利用GeoStudio软件对库水作用下的坡体进行渗流、应力-应变、稳定性数值模拟计算, 预测在库水作用下坡体的变形及稳定性变化规律。LI^[25]提出了三种堤坝白蚁蚁巢概化模型(虹吸式、直通式和串联式), 并基于非饱和渗流数值模型对蚁巢系统的水力特征进行分析; 近年来, 侯彦钊^[26]采用有限元软件模拟了虹吸式、直通式和串联式蚁巢概化模型对土石坝渗流场的演变规律。张宏亚^[27]分析了虹吸式蚁穴在动态发展过程中对堤防渗流稳定性变化规律, 并根据研究结果提出相关的防治建议。综合国内外近年的研究成果发现, 现有的土石坝渗流分析数值模拟研究主要集中在坝体材料和坝身结构方面, 目前尚缺乏白蚁蚁巢对堤坝内部结构破坏机理的深入了解, 且前人的研究大多集中于不同类型巢穴系统对蚁巢周围渗流孔压等的影响, 忽略了蚁巢系统对坝体其他部位的影响。

鉴于此, 本研究选择一个水库顺河坝作为研究对象, 采用GeoStudio软件建立有限元模型, 针对蚁巢赋存及库水位升降下土石坝渗流稳定性进行数值模拟。为了深入分析蚁巢系统对坝体渗流和应力变形的影响, 选取坝体上下游布置六个监测点, 观察不同蚁巢规模下坝体孔隙水压力和位移场的变化规律。最后, 基于模拟结果探讨了堤坝蚁巢系统的水力破坏机理。

1 工程概况、蚁巢特征及大坝安全监测

1.1 工程概况

白龟山水库位于淮河流域沙颍河水系沙河本干上, 距平顶山市中心9 km, 是一座以防洪为主, 兼

顾农业灌溉、工业和城市用水综合利用的大(2)型年调节水库^[28], 在城市供水和农业灌溉方面都发挥了重要作用。白龟山水库还作为漯河以西沙河干流水库的最后一道防线, 其下游保护对象有京广铁路、京广高铁、京港澳高速、107 国道等国家重要基础设施。

水库枢纽主要建筑物有拦河坝、顺河坝、北副坝、泄洪闸和南北干渠渠首闸。水库流域面积达 2 740 km², 总库容 8.65 亿 m³^[29]。水库正常蓄水位 103.00 m, 死水位 97.50 m, 汛期限制水位 102.00 m。洪水标准采用 100 a 一遇设计, 2000 a 一遇校核, 相应设计洪水位和校核洪水位分别为 106.19 m 和 109.56 m^[30]。白龟山水库处于暖温带和亚热带气候交错的边缘地区, 其适宜的气候条件及丰富的食物资源为白蚁创造了良好的生存环境。

1.2 白龟山水库的蚁巢特征

白龟山水库顺河坝迎水坡为块石护坡(干砌), 背水坡为草皮护坡, 坝后导渗沟与坝脚沟之间又有一定距离的台地, 这些均是适宜白蚁生存的空间。根据坝坡开挖现场情况(见图 1—图 3), 对发现的蚁巢特征进行统计, 如表 1 所列。顺河坝背水坡从上到下均存在严重的白蚁活动, 水库平台、导渗沟、坝脚处及排水沟均发现白蚁活动表象, 其中导渗沟左侧和坝脚处最为严重。将白蚁巢穴的尺寸从小到大排列, 可以发现主巢尺寸越大, 其距坝面距离越深, 蚁道直径越大, 体积最大可达 2 m³ 及以上, 且分布较深, 一般位于背水坡距坡面 2 m 之下, 主蚁道直径为 2~3 cm, 可直接洞穿坝体, 最长达 100 m 以上。在堤坝上一些蚁道甚至已经贯穿堤坝的内外坡, 在库水位上升的条件下, 会出现贯穿上下游坝坡的输水通道, 对坝体的安全带来隐患。当这些隐患发展严重时, 遇高水位等突发情况, 很容易造成漏洞和跌窝等险情, 大坝就可能出险甚至造成溃坝灾害。

1.3 大坝安全监测

白龟山水库顺河坝垂直位移监测分别在在上游平台、坝顶上游坝肩、坝顶下游坝肩、下游平台每隔 500 m 设置了 27 个断面共计 105 个沉陷标点, 从上游到下游编号依次为(-1、-2、-3、-4)。测量周期为 1 次/a。竖向位移符号规定向下为正, 向上为负。

白龟山水库顺河坝渗流监测包括测压管监测和渗流量监测。测压管布置: 于顺河坝七个断面(0+500、2+950、3+500、4+500、5+249、7+480、9+500)设置浸润线观测管, 每排 3 根; 并在 1+995、2+800、2+850、3+000、5+250 断面设置坝基测压管, 每排



图 1 坝坡蚁巢开挖现场

Fig. 1 Dam slope excavation treatment site



图 2 开挖的蚁巢标本

Fig. 2 Excavated termite nest specimen



图 3 坝坡蚁道开挖现场

Fig. 3 Dam slope excavation site of termite path

3~5 根不等; 在 0+500—0+600、1+700—3+500、5+250—8+000 三个坝段坝脚降压井之间设置 94 根井间压力管, 水库顺河坝部分坝基测压管埋设考证表如表 2 所列。顺河坝渗流量观测采用测流速法, 使用流速仪对渗流量进行实测。测量周期按照规范要求, 每周进行一次。

表 1 白龟山水库部分白蚁治理记录

Table 1 Termite control records in Baiguishan Reservoir

桩号	表象位置	距坝面距离/m	主巢尺寸(长×宽×高)/cm	主蚁道剖面情况	
				宽/cm	高/cm
顺河坝 3+850	坝中坡排水沟边缘	0.8	20×20×15	0.9	0.6
顺河坝 3+140	一平台上	0.5	21×21×25	1.0	0.8
顺河坝 2+105	导渗沟左侧	1.1	20×20×30	2.0	1.2
顺河坝 3+155	导渗沟左侧	0.8	30×30×30	3.0	1.5
顺河坝 31#井边	导渗沟左侧	0.5	50×50×60	2.0	1.6
顺河坝 2+900	坝脚沟边缘	1.3	60×60×70	2.4	2.0
顺河坝 9+700	坝中坡排水沟边缘	1.8	65×65×65	3.3	4.0
顺河坝 2+100	导渗沟左侧	1.9	70×70×60	3.0	2.0
顺河坝 9+600	护坡石上方 3 m 处	1.8	56×80×68	4.0	3.0
顺河坝 0+520	坝脚沟上方	1.55	82×80×50	3.2	1.8
顺河坝 3+100	导渗沟左侧	1.7	80×80×60	2.5	2.0
顺河坝 3+225	防汛公路南	2.3	70×70×80	2.3	2.0
顺河坝 3+750	坝脚沟边缘	2.5	80×80×70	2.4	2.1
顺河坝 9+670	坝脚沟上方 1.5 m	2.67	75×75×80	4.0	2.5
顺河坝 2+000	导渗沟左侧	2.0	80×80×80	4.0	3.0
顺河坝 3+800	坝脚沟上方	2.72	80×80×90	4.0	4.0
顺河坝 3+190	导渗沟左侧	2.9	90×90×80	3.0	2.0
顺河坝 4+100	导渗沟左侧	2.8	110×110×70	3.0	2.0
顺河坝 0+580	导渗沟左侧	2.4	150×120×50	3.0	4.0
顺河坝 0+550	导渗沟左侧	3.0	120×100×80	3.2	4.0
顺河坝 3+200	导渗沟左侧	3.1	120×120×90	5.0	5.0
顺河坝 3+740	坝脚沟边缘	3.4	120×130×120	5.0	4.0
顺河坝 3+250	导渗沟左侧	4.2	150×150×200	10.0	12.0

表 2 白龟山水库顺河坝部分坝基测压管埋设考证

Table 2 Verification table for the burial of pressure measuring pipe in part of dam foundation of Baiguishan Reservoir auxiliary dam

编号	管长/m	管口高程/m	管底高程/m	透水管长/m	沉淀管长/m	管口校测		备注
						日期	高程/m	
SC5225X27	16.80	100.58	83.78	1.50	0.50	2014-10-30	100.56	完好
SC5225X60	13.61	95.14	81.53	1.50	0.50	2014-10-30	95.15	完好
SC5250X40	12.13	97.09	85.02	2.07	0.50	2014-10-30	97.09	完好
SC6500X32	16.95	99.92	82.87	2.50	0.50	2014-10-30	99.34	完好
SC7500X30	13.63	99.93	86.39	2.00	0.50	2014-10-30	99.89	完好
SC1995X36	20.20	98.04	77.59	3.00	0.30	2014-10-30	98.04	完好

2 有限元计算模型

2.1 模型简介

GeoStudio 软件是广泛应用于土木工程和地质工程领域的数值模拟工具, 该软件可以对几乎所有的岩土工程以及环境岩土工程问题进行建模分析。在边坡稳定性、地下水流动和土壤渗流等方面表现出色, 能够处理复杂的几何形状和材料属性, 适用于非线性、时效性和动态响应分析, 满足不同的工程需求。其主要由多个模块组成, 其中 SEEP/W 用于地下水渗流模拟计算, SLOPE/W 模块用于边坡稳定分析, SIGMA/W 模块用于岩土应力变形分析, 每个模块针对特定的工程领域提供深入的分析功能。

2.2 坝体及蚁巢参数

白龟山水库顺河坝主要为均质土坝, 坝长 18 km, 坝顶宽 4~6 m, 坝顶高程 110.40~110.80 m, 最大坝高 16.26 m, 坝体填土以中、重粉质壤土为主, 坝基冲积层为二元结构, 上部为黏性土, 下部为中粗砂及砂卵石。在顺河坝背水坡选取合适位置进行开挖取样, 对土的基本物理性质(包括含水率、干密度、孔隙比等指标)、土的物理状态指标(包括塑性指数、液性指数等指标)、土坝力学特性试验(包括土的渗透特性、抗剪强度等)等相关试验, 得到顺河坝各部位的模型参数, 如表 3 所列。

典型的黑翅土白蚁巢穴系统由主巢、副巢、蚁道、泥被、以及分飞孔等组成。研究表明, 白蚁巢

表 3 堤坝及蚁巢物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the dykes and termite nests

材 料	渗透系数/ $m \cdot s^{-1}$	容重/ $kN \cdot m^{-3}$	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa	弹性模量/ kPa	泊松比
坝体填土	7.50×10^{-7}	19.60	13.5	26	3.0×10^4	0.30
排水砂带	1.00×10^{-5}	16.20	25.0	—	2.5×10^4	0.35
风化石渣干筑	1.50×10^{-4}	18.60	35.0	—	2.0×10^4	0.30
重粉质壤土	5.62×10^{-6}	19.50	17.9	28	4.0×10^4	0.35
煤矸石	6.50×10^{-6}	17.36	27.0	—	1.2×10^4	0.25
粉质黏土	1.20×10^{-7}	19.80	13.8	29	2.0×10^4	0.35
蚁 巢	8.00×10^{-5}	14.00	10.0	5	1.0×10^3	0.35
蚁 道	7.50×10^{-2}	—	—	—	—	—

穴的物理性质与周围堤坝材料存在显著差异,还会随着库水位的变化而改变^[31]。具体而言,蚁巢整体呈现类似海绵结构的非规则几何体,内部存在大量廊道和腔室,导致其压实度低、孔隙率高且整体较为潮湿,含水率通常高于坝体^[32]。此外,巢穴壁作为支撑和保护结构,通常更为坚固和持久。以上物性差异是蚁巢在正常蓄水位或者更低水位下的地球物理学特征,当水位上升,蚁巢内充满水时,密度会有一定的升高,但不会超过土石坝的密度^[32-33]。

蚁巢的物理状态参数通过室内试验测定,通过可变水头渗透试验对渗透性进行评估,采用烘干法测定含水量,环刀法测定土壤容重,比重法测定土壤组成。由于蚁巢内部为不均匀的大孔结构,菌圃呈海绵状,难以准确测定其容重,因此相关数据仅供参考。此外,通过重塑土三轴试验测定了蚁巢的力学参数,结果如表4所列。LI等^[25]的研究发现,当蚁道的饱和渗透系数大于 $1.16 \times 10^{-2} m/s$ 时,对计算域基质水分的输移影响已微乎其微。因此,本节取蚁道饱和渗透系数为基质土壤的 1×10^5 倍,即 $7.5 \times 10^{-2} m/s$ 。

2.3 非饱和土壤渗流及边坡稳定理论

2.3.1 非饱和土壤中的水流方程

渗流计算基于饱和与非饱和土体渗流的二维达西公式,在库水位的变动过程中,浸润线也随之发生变化,因为浸润线以上是非饱和土体,在浸润线以下是饱和土体。饱和与非饱和问题就可以归结于库水位的变化而导致的,根据在单位时间内微分体中流入与流出的水量差,二维渗流微分方程可以表达为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

式中, H 为总水头(m); K_x 为 x 方向的渗透系数($m \cdot s^{-1}$); K_y 为 y 方向的渗透系数($m \cdot s^{-1}$); Q 为施加的边界流量($m \cdot s^{-1}$); θ 为单位体积含水量; t 为时间(s)。

对于满足达西定律的有限元法渗流分析,其空间流场需满足以下定解条件。

(1)初始条件。在渗流区域 Ω 内

$$h|_{t=0} = f_0(x, y, 0) \quad (2)$$

(2)边界条件。水头边界,在边界曲面 Γ_1 上

$$h|_{\Gamma_1} = f_1(x, y, t) \quad (3)$$

流量边界,在边界曲面 Γ_2 上

$$k_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = f_2(x, y, t) \quad (4)$$

式中, Ω 为渗流区域; Γ_1 为已知水头值的边界曲面; Γ_2 研究区域为已知流量值的边界曲面; $h = h(x, y, t)$ 为待求水头函数; $f_0(x, y, 0)$ 为表示各点的初始水头值(m); $f_1(x, y, t)$ 为水头边界曲面 Γ_1 的已知水头值(m); $f_2(x, y, t)$ 为流量边界曲面 Γ_2 的已知流量值($m \cdot s^{-1}$); n 为流量边界曲面 Γ_2 的法线方向。

2.3.2 土壤水分特征曲线模型

在非饱和土中,土水特征曲线用来描述土体基质吸力与体积含水量之间的关系。本文选用 VAN-GENUCHTEN 非饱和土壤水分特征曲线为

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\varphi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (5)$$

式中, θ_w 为体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$); θ_s 为饱和体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$); θ_r 为残余体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$); φ 为基质吸力(kPa); a 、 n 、 m 为土壤水分特征曲线拟合参数。

非饱和土的渗透系数其控制方程表达式为

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\varphi^{n-1})(1 + a\varphi^n - m)]^2}{(1 + a\varphi^n)^{\frac{m}{2}}} \quad (6)$$

式中, k_w 为渗透系数函数($m \cdot s^{-1}$); k_s 为饱和渗透系数($m \cdot s^{-1}$); θ_s 为饱和体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$); φ 为基质吸力(kPa); a 、 n 、 m 为土壤水分特征曲线拟合参数。

2.3.3 非饱和土的边坡稳定理论

摩尔-库伦强度准则是极限平衡法的基础, 计算公式为

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad (7)$$

式中, τ_f 为破坏面上的剪应力 (kPa); c' 为有效黏聚力 (kPa); φ' 为有效内摩擦角 ($^\circ$); σ' 为破坏时的法向有效应力 (kPa)。

坝坡稳定的度量指标就是安全系数。坝坡若沿某滑动面滑动, 通过除以安全系数, 降低土的抗剪强度指标为 c'/F 和 $\tan \varphi'/F$ 时, 在此滑动面条件下土体就达到了极限平衡状态, 依据上述基本假定, 可知土条底部切向力与水平力的关系为

$$\tau = c'_e + \sigma'_n \tan \varphi'_e \quad (8)$$

$$c'_e = \frac{c'}{F} \quad (9)$$

$$\tan \varphi'_e = \frac{\tan \varphi'}{F} \quad (10)$$

2.4 模型建立及边界条件

根据白龟山水库工程地质资料和白蚁调查报告, 本文选取白龟山水库顺河坝桩号 0+400 断面建立数值模型, 顺河坝模型如图 4(a) 所示。

在利用 GeoStudio 软件开展蚁巢赋存条件下坝体安全数值模拟研究时, 白蚁巢穴的几何形态和物理性质是影响模拟结果的关键因素。尽管白蚁巢穴整体为海绵结构的非规则几何体, 但其整体形态通常较为接近圆形或椭球形^[32]。此外, 白蚁巢穴与周围土体存在显著的物理性质差异, 例如密度、电阻率等。在数值模拟中, 将白蚁巢穴简化为圆形后, 这种差异在模型中仍然可以体现出来, 便于通过对比来识别白蚁巢穴的位置。在实际工程应用中, 例如堤坝白蚁防治, 简化为圆形结构能够为工程设计和施工提供较为直观的参考。在实际探测中, 使用地质雷达探测白蚁巢穴时, 圆形结构的反射波特征较为明显, 通常呈抛物线形态。这种特征使得在探测

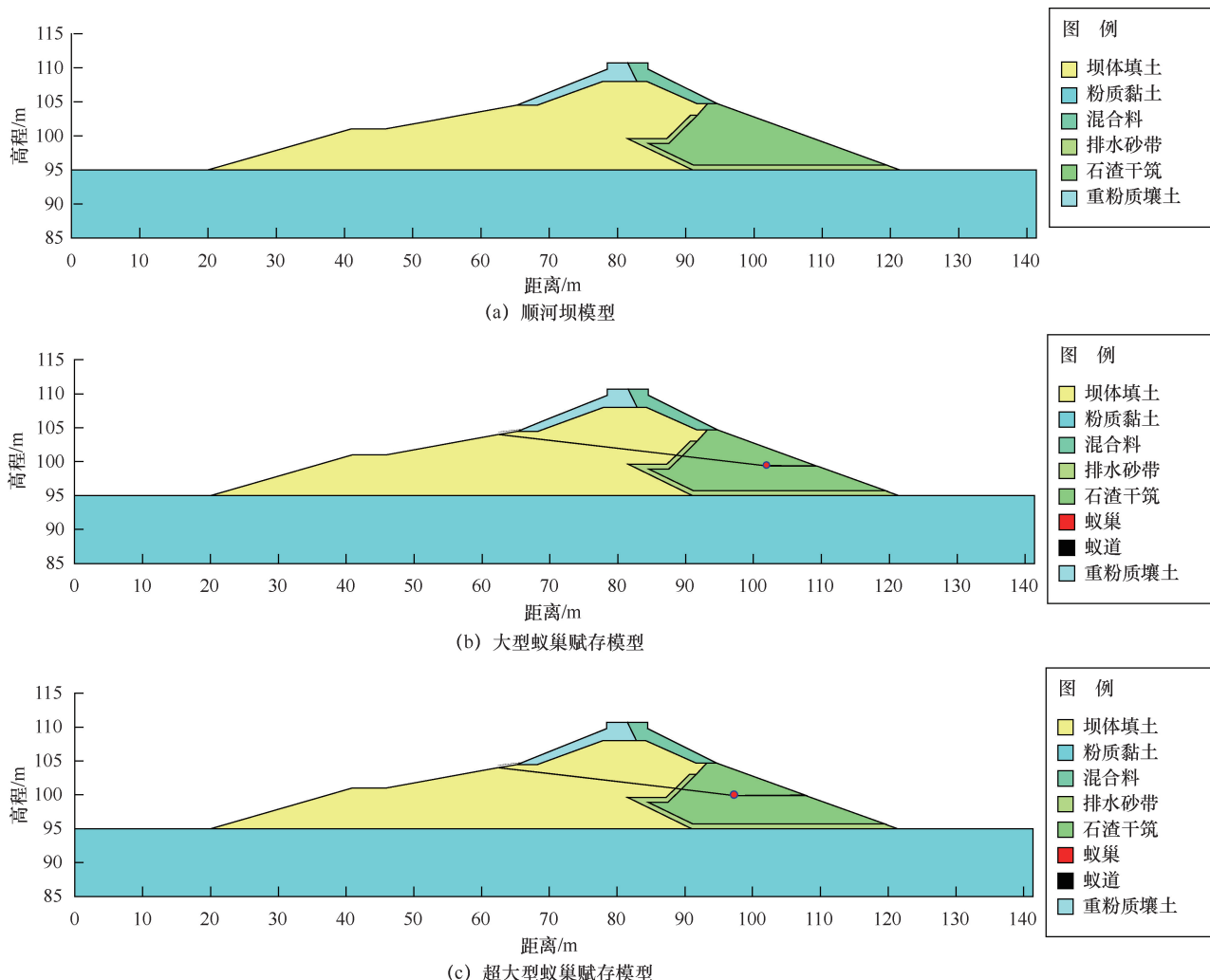


图 4 数值模型建立

Fig. 4 Numerical model setup

过程中能够更快速地识别和定位白蚁巢穴, 从而显著提高探测效率^[2]。

从尺寸上看, 巢体入土深度一般随蚁巢直径变大而变大。综上所述, 将白蚁巢穴简化为圆形在形态特征、计算便利性、对称性假设、与周围介质的对比性、工程应用以及理论研究等方面都具有一定的合理性。这种简化方法能够在一定程度上满足工程和研究的需要, 同时避免了因过于复杂的分析过程而带来的不便。

根据上文对白龟山的蚁巢特征的分析, 蚁巢系统在修筑的过程中根据堤坝的结构、填筑材料以及堤坝扩建、加固等而呈现出不同的形态, 甚至蚁道的结构、位置与库水位变化也有一定的联系。随蚁巢尺寸从小到大, 蚁巢需经过几次转移, 巢位也逐渐随着移动, 由浅入深。选取坝坡下游部位布置蚁巢系统, 为探究蚁巢的位置与尺寸变动对坝体产生的影响, 选择两种结构形态的蚁巢系统建立土石坝蚁巢赋存模型, 如图 4(b)(c) 所示, 具体参数如表 4 所列。本文土石坝、蚁巢和蚁道网格尺寸划分均为 1 m。

表 4 堤坝白蚁巢穴的结构形态

Table 4 Physical and mechanical parameters of dyke and termite nest

巢穴分类	蚁巢直径/m	入土深度/m	蚁巢坡距/m	蚁道直径/cm
大型蚁巢	1.0	2	2.5	2.5
超大型蚁巢	1.2	3	3.5	3.0

模型水力边界条件设定: 两侧地下水位线以下为定水头边界, 背水坡水位线以上为渗透边界, 坝体底部为不透水边界。应力应变模型边界条件设定: 地基两侧 x 方向位移为 0, 底部 x 和 y 方向位移为 0。

为了深入分析蚁巢系统对坝体渗流和稳定性的影响, 观察库水位升降、蚁巢赋存下进行坝体渗流场规律变化。构建有限元模型, 选取坝体上下游布置六个监测点, 如表 5 所列。其中, 监测点 A、B、C 位于迎水坡, 监测点 D、E、F 则位于背水坡。具体设置为: 点 A、D 分别设置于迎水坡水位最高点和蚁巢内部, 点 B、E 设置于上下游蚁道处, 点 C、F 则设置于坝体初始状态浸润线附近。

表 5 堤坝模型监测点坐标

Table 5 Coordinates of monitoring points for the dam mode

点 位	监测点 A	监测点 B	监测点 C	监测点 D	监测点 E	监测点 F
大型蚁巢	(69, 106)	(74, 103)	(74, 100.1)	(102, 99.44)	(109.22, 99.4)	(102, 97.6)
超大型蚁巢	(69, 106)	(74, 103)	(74, 100.1)	(97.5, 100)	(107.78, 100)	(97.5, 97.6)

2.5 参数率定与验证

为了验证参数选取的合理性, 提高模拟结果的准确度。根据白龟山水库安全监测项目布设的监测点位, 选取 2019 年 9 月 10 日—2020 年 2 月 10 日的顺河坝垂直位移监测数据和测压管监测数据, 具体水位变化为 99.09~102.27 m, 通过将 GeoStudio 模型的输出结果与实际监测数据进行对比, 验证模型的可靠性。

测压管监测数据选取了测压管 SC7500X30 的水头监测数据, 与 SEEP/W 模型输出结果进行对比分析。如图 5 所示, 测压管监测的水头值与模型模拟值基本一致, 最大总水头分别为 96.71 m 和 96.77 m, 两者差距 0.06 m, 模拟值与监测值基本吻合。

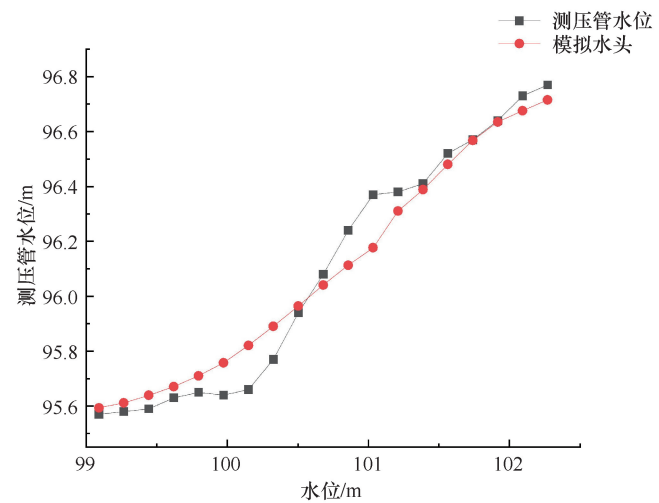


图 5 测压管水位与模拟值对比

Fig. 5 Comparisons of the piezometric pipe water levels with the simulated values

顺河坝垂直位移监测数据选取了上游 103 平台、坝顶 110.4 上游平台及下游 101 平台的位移数据, 并与 SLOPE/W 模型输出结果进行对比分析(见图 6)。结果显示, 在库水位升降期间, 顺河坝的位移监测值与模型输出值接近, 位移值范围为 1.161 0~4.073 7 mm, 模拟值与监测值基本一致。其中, 上游 103 平台的位移变化最大, 下游 101 平台的位移变化最小(竖直方向的位移以向下为正)。

2.6 工况及情景设置

本次工况设计主要考虑坝体库水位升降对坝体

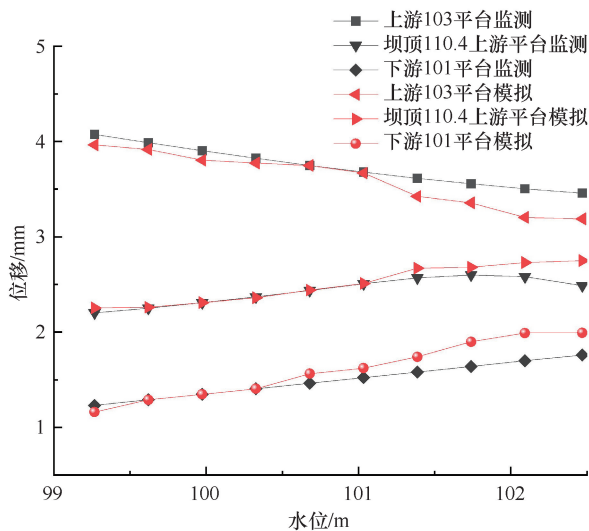


图6 垂直位移监测与模拟值对比

Fig. 6 Comparison of vertical displacement monitoring and simulation values

渗流稳定性的影响。该水库的基本运行参数如下：正常蓄水位 103.00 m，死水位 97.50 m，汛限制水位 102.00 m。洪水标准采用 100 a 一遇设计，2000 a 一遇校核，相应设计洪水位和校核洪水位分别为 106.19 m 和 109.56 m。其中水库曾经历“75·8”大水，水位达到了 106.21 m，超过了设计水位，最大入库流量和最大出库流量均达历史峰值。根据河南省白龟山水库汛期调度运用计划，主汛期的汛限制水位在 102.00~102.60 m 之间动态控制，汛后按正常蓄水位 103.00 m 运行。

基于上述背景，本次研究选取了两种水位变化工况，即模拟库水位以不同的速率从汛限制水位上升至设计洪水位再回落至正常蓄水位，以观察坝体库水位升降的瞬态渗流情况。本文水位变化共有 40 d，具体工况如下：(1) 正常速率。上游水位从汛限制水位 102.00 m，在 10 d 内以恒定速度 0.4 m/d 上升至 106.00 m，随后保持该水位稳定 10 d，再以 0.3 m/d 的速度从 106.00 m 下降至 103.00 m，并维持 10 d 结束。(2) 突然水位上升。上游水位从汛限制水位 102.00 m 开始，在 5 d 内以恒定速度 0.8 m/d 快速上升至 106.00 m，随后保持该水位稳定 15 d，再以 0.6 m/d 的速度从 106.00 m 下降至 103.00 m，并维持 15 d 结束。在此期间，背水坡水位保持 95.60 m 不变。情景设置包括正常情况（坝体无蚁巢系统）以及两种蚁巢赋存情景，以对比分析蚁巢规模对坝体渗流稳定性的影响。

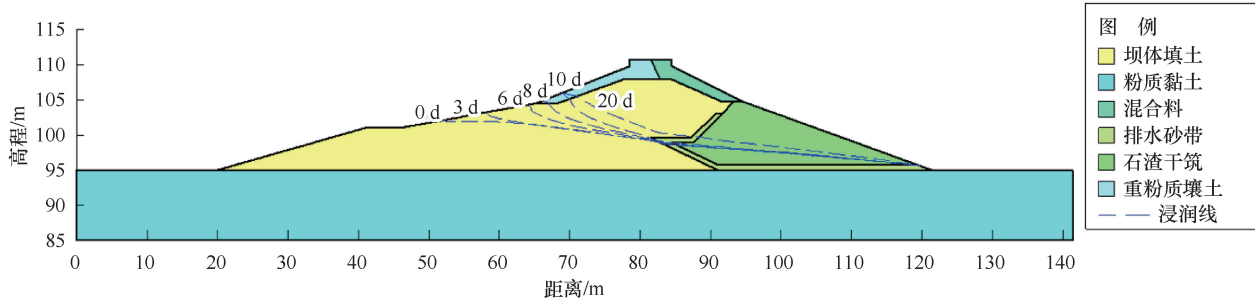
3 结果分析

3.1 不同蚁巢赋存下土石坝渗流破坏风险模拟

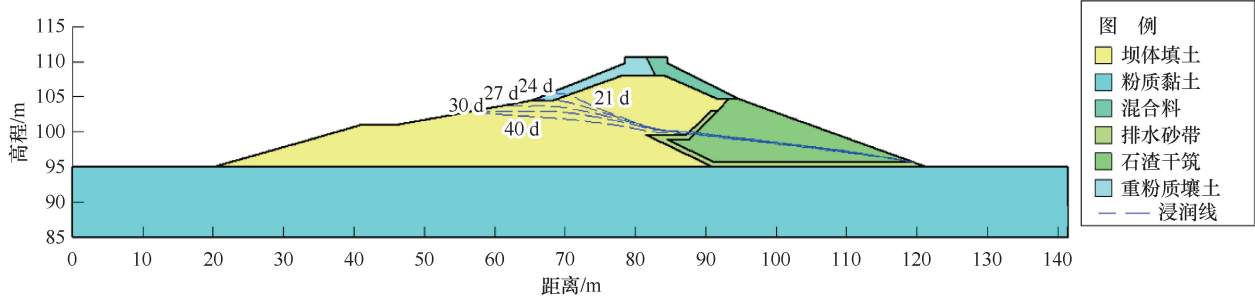
为探究不同规模蚁巢系统对土石坝渗流特性的影响，本研究利用 GeoStudio 软件首先对正常情况下的土石坝进行渗流分析，工况设置为水位一次升降过程。库水位升降下浸润线的变化结果如图 7 所示，其中蓝线表示随库水位升降下浸润线的变化。图 7(a) 为正常情况下 0~20 d 浸润线的变化图像，图 7(b) 为 21~40 d 的变化图像。在 0~10 d，土石坝的浸润线随水位的上升而上升，反映了孔隙水压力的增长趋势；在 10~20 d，水位保持最高位置不变，浸润线前段的高度逐渐增加；在 20~30 d，水位开始下降，浸润线随之下降，并呈现前段上凸的形态；在 30~40 d，水位线保持最低位置不变，而浸润线仅有小幅下降，并未回落至初始水平。这一现象说明堤内孔隙水压力的变化相对于上游水位的变化表现出明显的滞后特性。

在分析正常情况下土石坝渗流场规律变化后，对蚁巢赋存下的渗流模拟结果进行了分析。图 7(c) 和图 7(e) 分别为大型蚁巢和超大型蚁巢赋存下 0~20 d 浸润线的变化图像，图 7(d) 和图 7(f) 分别为大型蚁巢和超大型蚁巢赋存下 21~40 d 的变化图像。可以看到蚁巢系统主要分布于堤坝坝面以下、常水位浸润线以上的位置，一般靠近背水坡。两种蚁巢规模下的坝体浸润线的变化相似。在常水位情况下并不影响坝体浸润线分布。随着水位上升，两种情况下的浸润线持续升高，当水位上升至蚁道通风口位置时，浸润线迅速抬高至蚁道以上，并在石渣干筑处再次上升；在水位维持阶段，浸润线存在滞后现象和蚁巢系统高渗透性的影响导致其位置继续上升直至与迎水坡水位持平；在水位下降阶段则都延缓了浸润线的下降，使浸润线长时间保持在较高水平，但是可以发现蚁道直径更大的超大型蚁巢的浸润线下降更慢，大型蚁巢的浸润线在 27 d 时已经下降到蚁道下方，但是超大型蚁巢的浸润线始终维持在蚁道上方区域，综上所述蚁道直径的增加会导致浸润线下降速度变缓，不利于坝体的安全和稳定性。

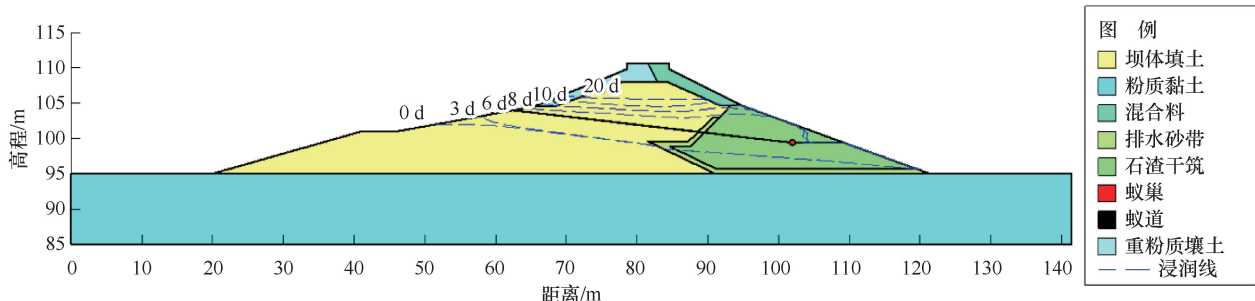
相较于正常情况，蚁巢系统的存在导致水位上升阶段，坝体浸润线特别是下游部位上移，以及在水位下降阶段延缓浸润线的下降，导致坝体饱和区域增加。相较于饱和土，非饱和土体由于基质吸力的存在，其抗剪强度通常高于饱和状态。同时较低的渗透



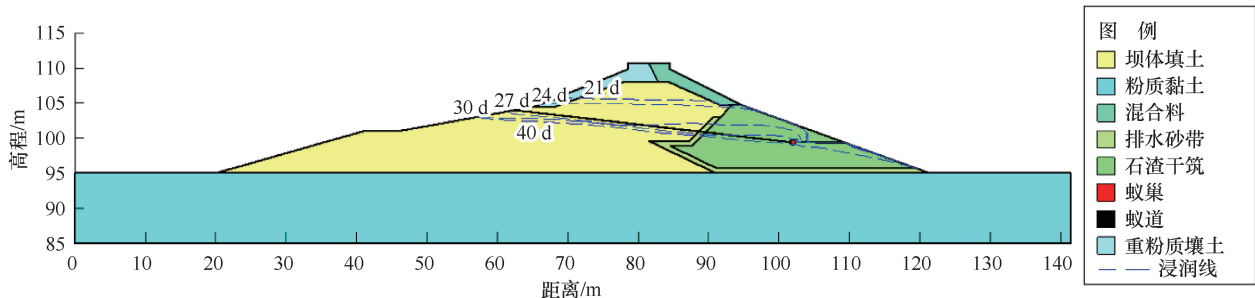
(a) 正常情况下0~20d浸润线变化



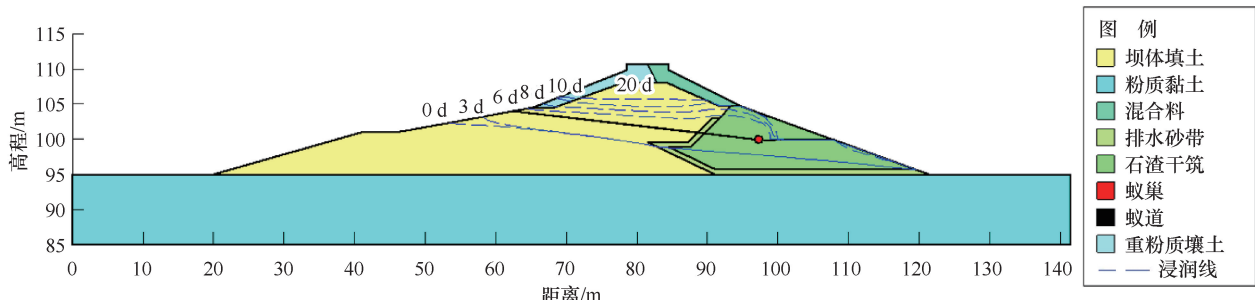
(b) 正常情况下21~40d浸润线变化



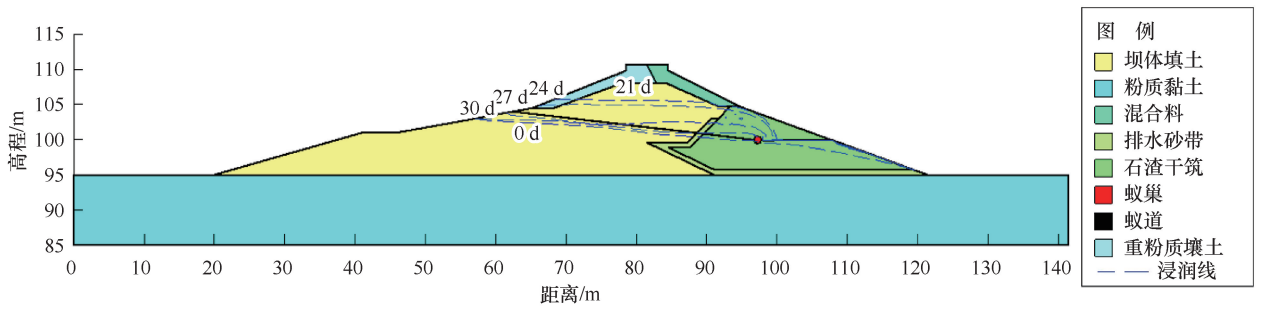
(c) 大型蚁巢赋存下0~20d浸润线变化



(d) 大型蚁巢赋存下21~40d浸润线变化



(e) 超大型蚁巢赋存下0~20d浸润线变化



(f) 超大型蚁巢赋存下21~40d浸润线变化

图7 库水位升降下坝体浸润线的变化

Fig. 7 Dynamics of the infiltration line of the dam under the change of the water level

性可以减少坝体的渗透压力, 从而降低渗透破坏的风险。蚁巢系统造成浸润线位置上移, 对坝体的稳定性产生了不利影响。而在水位降落期间, 因为孔隙水压力未能及时消散, 结合蚁道的高渗透性, 导致正常情况下的均质坝相比, 浸润线维持在较高的水平。

孔隙水压力的存在会降低土石坝中颗粒之间的有效应力, 从而减少土体的抗剪强度, 直接影响土石坝的稳定性。因此, 对其监测和控制对于确保工程安全具有重要意义, 各监测点在水位升降过程中的各监测点孔隙水压力变化图像如图8所示。各监测点的变化特征如下。

监测点 A、B、C 设置于坝坡上游, 其中监测点 A 位于迎水坡水位最高点, 各个情景下孔隙水压力变化曲线基本一致。模拟结果显示, 在水库水位未达到监测点高程时, 孔隙水压力变化不显著, 当水位攀升至监测点高程附近时, 孔隙水压力出现显著增加, 并随着水位下降而降低, 但未能回落至初始水位前的水平。相较于监测点 B、C, A 点位于上游边坡附近, 受蚁巢系统影响较小, 其孔隙水压力变化与正常情况相似; 对于监测点 B 和 C, 两种蚁巢赋存的孔隙水压力的变化规律总体相似, 蚁巢赋存下孔隙水压力增速和峰值均高于无蚁巢情况。特别地, 点 B 相较于 C, 蚁巢赋存下孔隙水压力上升时机早于均质坝。这一现

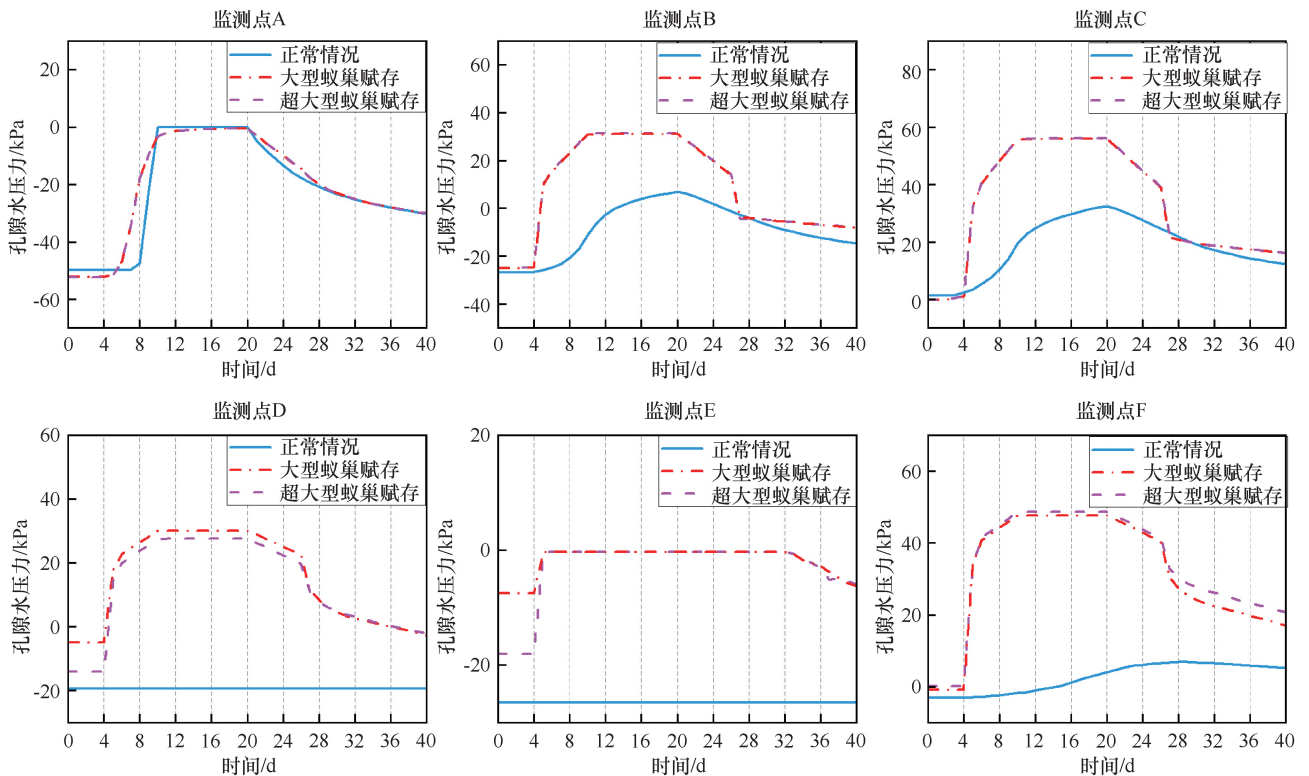


图8 各监测点孔隙水压力变化

Fig. 8 Pore water pressure dynamics at each monitoring point

象主要归因于监测点 C 靠近坝体初始浸润线, 水位变化直接影响浸润线的变化进而影响孔隙水压力。相较之下, 监测点 B 则位于坝体内部, 均质坝的浸润线对坝体水位的响应存在滞后, 导致水位上升时浸润线变动不及时, 从而导致点 B 孔隙水压力的相比于水位的上升存在滞后增长。而蚁巢系统的存在破坏了坝体渗流场, 使得蚁巢赋存下浸润线变动提前, 促使监测点 B 的孔隙水压力提前上升。此现象表明, 与正常情况相比, 蚁巢赋存下坝体的孔隙水压力对水位变化更为敏感。

布置于坝坡下游的监测点 D、E、F 显示, 均质坝下游部位的孔隙水压力对水位变化的响应较为有限。而在蚁巢赋存下, 两种蚁巢赋存的孔隙水压力变化与上游监测点的规律类似, 表现出对水位变化的敏感性, 且各点孔隙水压力远高于正常情况, 但是超大型蚁巢赋存下的起始孔隙水压力更小。由此可见, 蚁巢系统显著提高了土石坝尤其是下游部位的孔隙水压力, 但是不同蚁巢直径、蚁巢位置和大小对孔隙水压力的影响不大。

3.2 不同蚁巢赋存下坝体变形破坏风险模拟

通过有限元软件模拟, 获得了三种情景下边坡位移场的计算结果。为了定量分析边坡应力变形场的变化规律, 绘制上述三种情景下坝体位移场在不同时间点的变化图(见图 9 和图 10)。基于这些结果, 我们

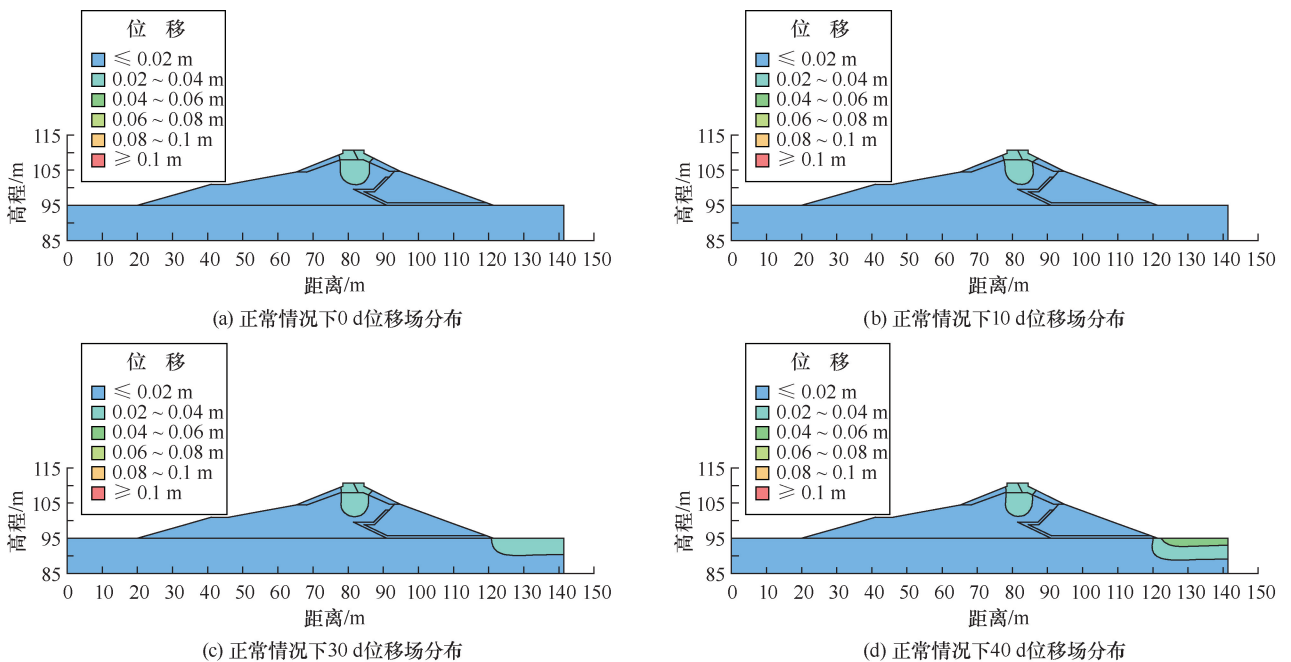
进一步深入分析了蚁巢赋存条件下边坡应力变形场的演化规律, 揭示了蚁巢对坝体应力变形的影响机制。

库水位升降对土石坝的应力分布与位移均存在影响。在库水位在升降过程中, 正常情况下各时间点的位移场变化如图 9 所示。坝体位移场变化表明, 初始状态时坝体中间部位变形最大, 随着水位的变动, 坝体下游地基部位的位移则有所增加。但总体来看, 正常情况下库水位升降过程中坝体位移变化值很小, 库水位升降对坝体应力变形的影响较为有限。

与正常情况相比, 白蚁危害情况下会导致坝体位移增大, 影响位置主要集中在坝体下游蚁巢系统以上的区域, 随着水位的上升, 变形幅度逐渐增大, 水位下降时变形幅度减小。此外蚁巢规模越大, 位移幅度也越大。

3.3 不同蚁巢赋存下坝体边坡稳定性影响模拟

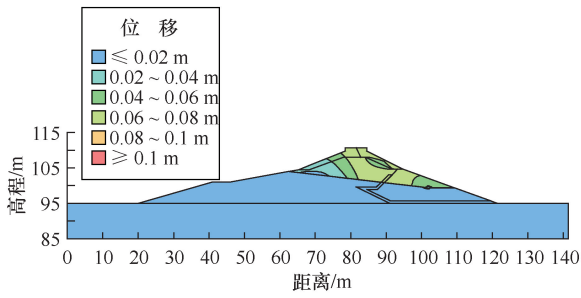
本次边坡稳定性计算采用 SLOPE/W 模块中的摩根斯顿普-赖斯法, 评估不同蚁巢赋存下土石坝安全系数。整体的土石坝模型采用与渗流稳定分析相同的模型尺寸, 参数和工况同前。滑裂面的搜索方法则采用软件提供的自动搜索功能。参照《碾压式土石坝设计规范》, 规定大坝为二级建筑物, 正常运行条件下, 坝坡抗滑稳定最小安全系数应不小于 1.35。



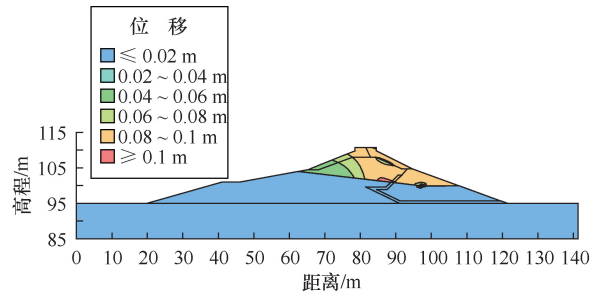
x 方向的位移以向左为正, y 方向的位移以向下为正

图 9 不同时间顺河坝位移场变化

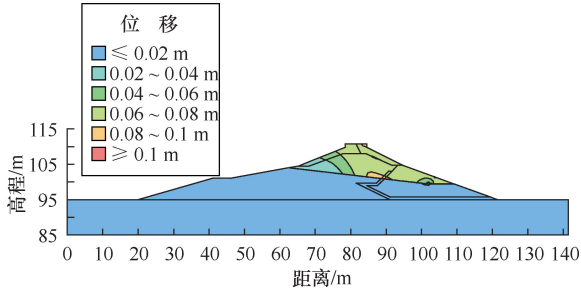
Fig. 9 Changes of the dam displacement field at different times



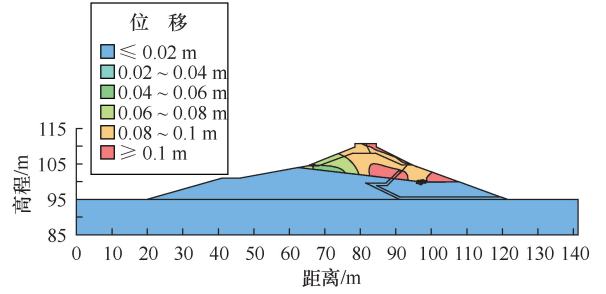
(a) 大型蚁巢赋存下0 d位移场分布



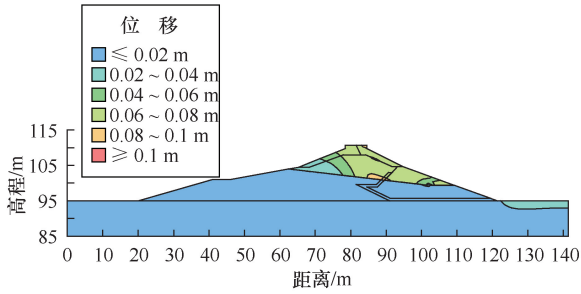
(f) 超大型蚁巢赋存下0 d位移场分布



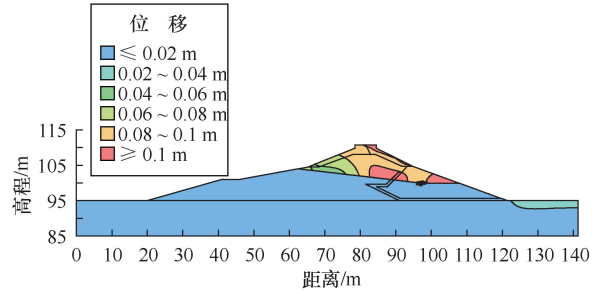
(b) 大型蚁巢赋存下10 d位移场分布



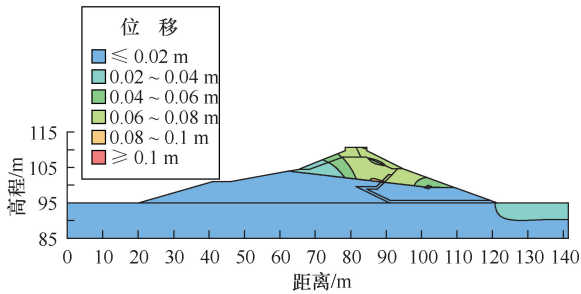
(g) 超大型蚁巢赋存下10 d位移场分布



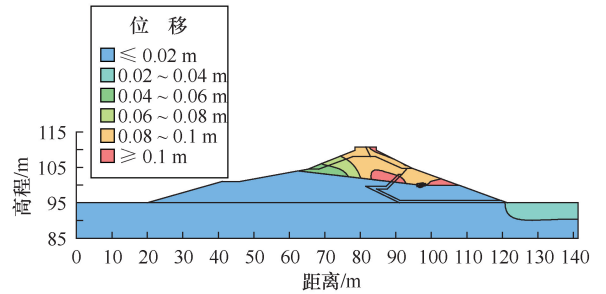
(c) 大型蚁巢赋存下20 d位移场分布



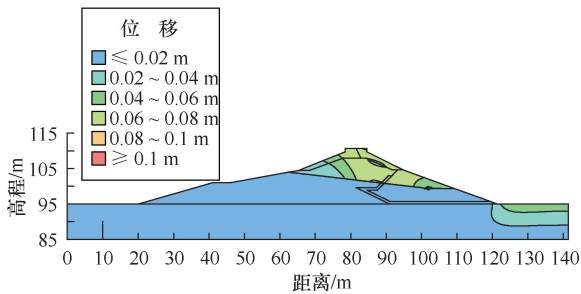
(h) 超大型蚁巢赋存下20 d位移场分布



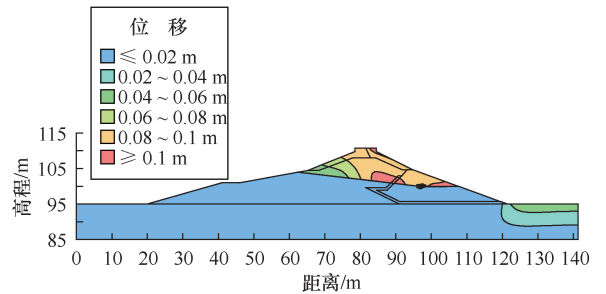
(d) 大型蚁巢赋存下30 d位移场分布



(i) 超大型蚁巢赋存下30 d位移场分布



(e) 大型蚁巢赋存下40 d位移场分布



(j) 超大型蚁巢赋存下40 d位移场分布

x 方向的位移以向左为正, y 方向的位移以向下为正

图 10 两种蚁巢赋存下坝体位移场变化

Fig. 10 The displacement field of dam body changes under the occurrence of two types of ant nests

三种情景下的安全系数随时间变化动态如图 11 所示。正常情况下, 均质坝的安全系数随库水位升降经历四个阶段: 在水位上升阶段, 由于孔隙水压力存在滞后现象, 导致库水向坡体内渗透, 渗透压力和静水压力共同对坝坡产生积极作用, 使稳定性系数提升; 当水位稳定后, 浸润线逐步上升导致非饱和和区域减小, 基质吸力逐渐消散, 土体的物理强度指标降

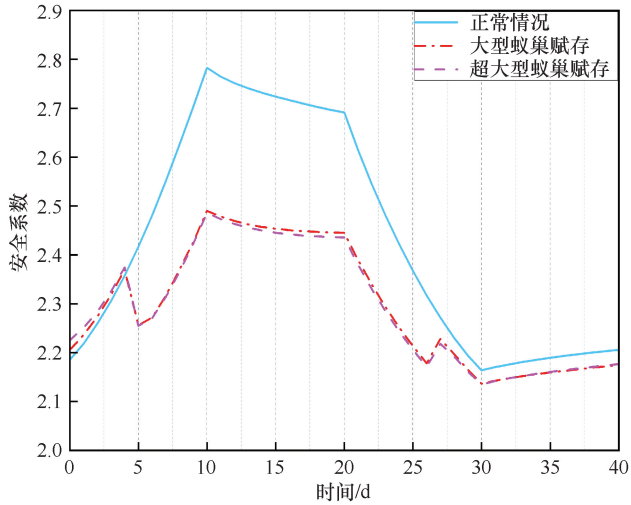


图 11 安全系数随时间变化对比

Fig. 11 Comparisons of safety factor over time

低, 导致坝体安全系数相应减小。在水位下降阶段, 坝体内部水力条件发生变化, 静水压力和渗透压力降低, 对坝坡的支撑作用削弱, 进而降低了安全系数; 水位稳定后, 积聚于上游坝体的水体开始向下游渗流, 使安全系数有所回升, 并最终趋于稳定值。

对于蚁巢赋存情景, 两种情况的安全系数变化规律相似, 当水位上升至蚁道通风口入口时, 由于蚁道的渗透性远超坝体材料, 水流能够迅速通过坝体, 导致该处坝体孔隙水压力增加(见图 8), 破坏了坝体的稳定性, 使安全系数迅速下降。由两种情况下最危险滑移面位置图(见图 13 和图 14), 最危险的滑动面出现在 30 d, 即水位下降至最低点时, 此时水流已通过蚁道贯穿上下游坝坡, 正常情况下、大型蚁巢及超大型蚁巢下的安全系数分别为 2.162、2.138 和 2.136, 可以看到蚁巢规模对坝体稳定性的影响较小。

3.4 不同库水位升降下蚁巢赋存对坝体边坡稳定性影响模拟

在上文对水库汛期调度下正常运行工况的分析基础上, 为进一步探究非正常运行情况(如强降雨导致的水位急剧上升)对水库安全性的影响, 本研究开展了突然水位上升工况下的数值模拟分析, 并将其与正常工况进行对比, 深入探讨不同库水位升降速率下

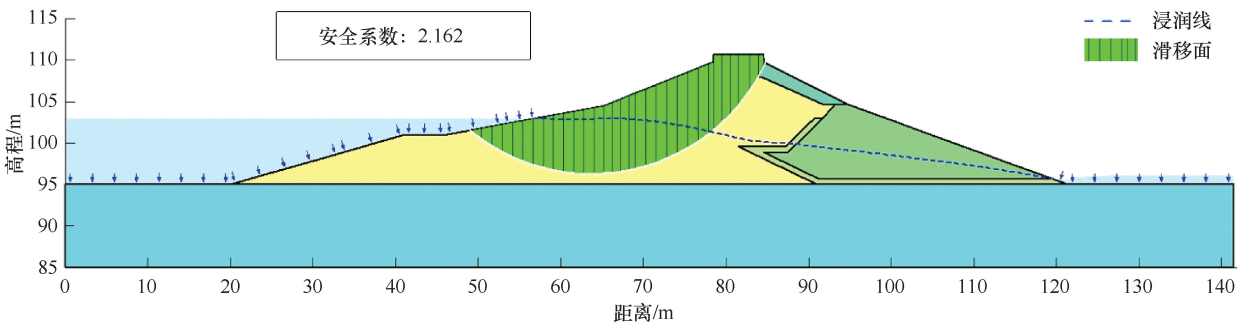


图 12 正常情况下最危险滑移面位置(30 d)

Fig. 12 The most dangerous slip plane under normal circumstances (30 d)

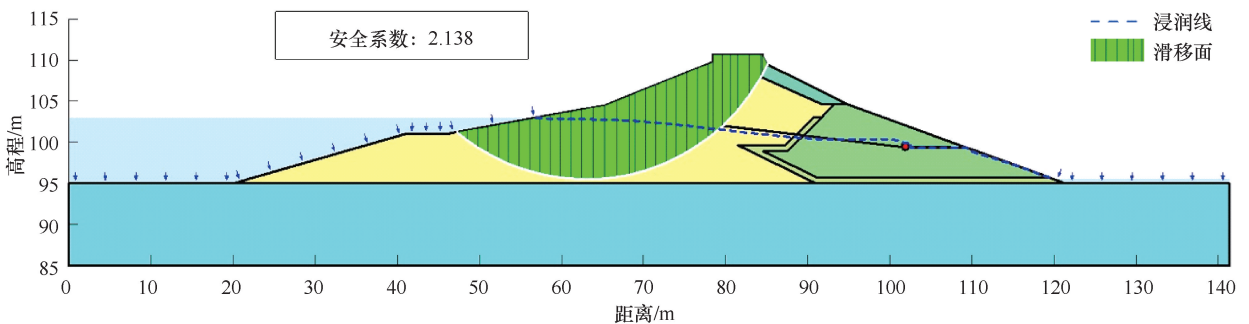


图 13 大型蚁巢赋存下最危险滑移面位置(30 d)

Fig. 13 The most dangerous slip plane for large ant nests(30 d)

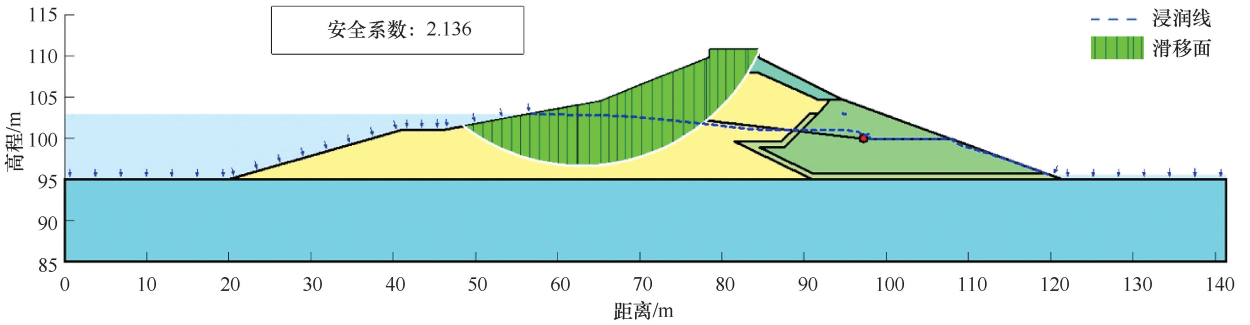


图 14 超大型蚁巢赋存下最危险滑移面位置(30 d)

Fig. 14 The most dangerous slip plane for super-Large ant nests(30 d)

蚁巢赋存对坝体边坡稳定性的影响。本次边坡稳定性计算采用 SLOPE/W 模块中的摩根斯顿-普赖斯法, 评估不同库水位升降速率下蚁巢赋存对土石坝坝体边坡稳定性的影响。整体土石坝模型采用上文所述的大型蚁巢赋存情景, 相关参数和工况设置与前文一致。

图 15 展示了两种工况下边坡安全系数随时间的动态变化曲线。鉴于上文已对安全系数在不同阶段的变化规律进行了详细分析, 此处不再重复赘述。通过对比正常工况与水位突升工况, 可以发现以下规律: 水位上升速度越快, 边坡安全系数的上升速度越快、增长幅度越大, 且所能达到的峰值也越高; 在蓄水阶段, 水位上升速度越大, 安全系数的下降幅度也越显著; 同样地, 在水位下降阶段, 水位下降速度越快, 安全系数的下降速度越快、下降幅度越大, 但最终两者均趋于同一稳定值。综上所述, 水位变化速度越快, 对边坡稳定性越不利。

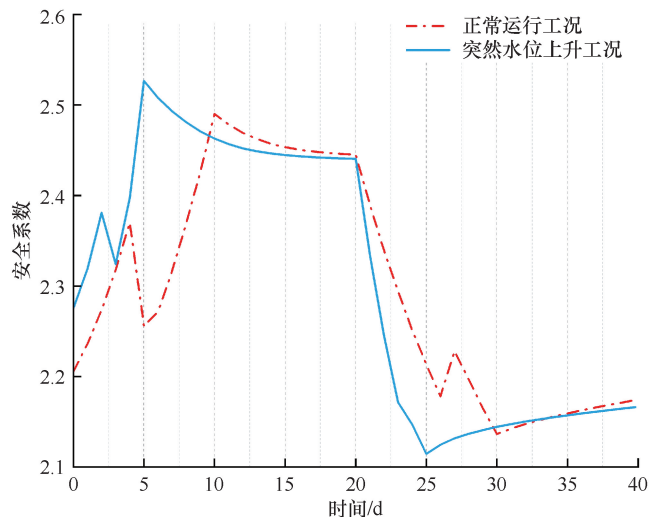


图 15 安全系数随时间变化对比

Fig. 15 Comparisons of safety factor over time

4 讨论

(1) 不同蚁巢系统及库水位升降对坝体渗流作用的影响因素探讨。本研究探讨了蚁巢系统对土石坝渗流特性的影响。结果表明, 蚁巢系统显著地改变了坝体的渗流特性, 提升了坝体的浸润线位置。这一现象主要与迎水坡水位和蚁道通风口的位置关系密切相关。在水位下降阶段, 蚁道的存在会延缓浸润线的下降, 使其长时间保持在较高水平, 这与 LI^[25] 的研究结果存在差异, 后者指出当迎水坡水位降至蚁道入口以下时, 堤内浸润线位置的下降速度会加快, 这种差异可能源于坝体参数如渗透系数的不同, 但具体原因仍需进一步探究。此外, 有学者在土堤渗流分析中观察到含虹吸式蚁穴的土堤内浸润线通常位于蚁道位置以下^[27], 这与本研究中水位上升至蚁道通风口位置时浸润线迅速抬高至蚁道以上的发现有所不同, 表明不同蚁巢结构类型对坝体浸润线的位置和形状有显著影响。众多学者^[26-35] 探究了蚁巢系统对蚁巢周围区域的渗流孔压的影响, 结果表明, 不同类型的蚁巢系统均能改变蚁巢周围的渗流孔压, 且影响程度大致相似。本文通过土石坝的关键区域布置一系列监测点, 通过分析这些监测点的孔隙水压力变化规律, 进一步发现了蚁巢系统对坝体孔隙水压力分布的空间差异性影响。研究表明, 蚁巢系统普遍提高了土石坝各区域的孔隙水压力, 尤其是下游部位, 但对上游边坡附近区域的影响相对较小。此外, 蚁巢系统的存在还提升了坝体内部孔隙水压力对水位变化的敏感性, 导致了坝体内部的浸润线相较于无蚁巢情况提前发生变动。

此外本研究通过分析不同蚁巢赋存情况及库水位升降速率对土石坝安全运行的影响。研究发现, 蚁巢的位置和尺寸对土石坝的渗流破坏和边坡稳定性的影响相对较小。然而, 较大的蚁巢规模和直径会显著增加坝体变形破坏的风险。此外, 相比于蚁巢规模, 库

水位升降速率对坝坡稳定性的影响更为显著: 水位变化速度越快, 对坝坡稳定性的不利影响越大。

综上所述, 本研究探讨了不同库水位升降速率及蚁巢规模对土石坝安全运行的影响。然而, 通过对前人研究发现, 不同的蚁道结构对土石坝的影响存在差异。除此之外, 土石坝的材料参数、气候变化因素, 例如降雨, 以及地震等自然灾害, 同样是影响土石坝安全稳定的重要因素。因此, 未来的研究需要扩展到更广泛的环境条件, 这包括考虑降雨、地震等自然条件, 以及不同蚁道结构的蚁巢对土石坝的影响。同时, 考虑到不同土质坝体的特性, 在研究中同样不可被忽视。

(2) 蚁巢系统参数对坝体渗流敏感性影响分析。在微调蚁巢参数的试算过程中, 本文发现饱和含水量是一个敏感性较高的参数, 但饱和渗透系数对渗流分析的影响更为显著。饱和渗透系数越大, 蚁巢系统对坝体产生的影响也越明显, 这与李颖的研究结果相吻合^[36]。此外, 弹性模量与坝体变形幅度成反比, 而泊松比对坝体的应力变形影响相对较小。

蚁道对坝体的影响同样不容忽视。特别值得注意的是, 相比于蚁巢, 特定水位条件下蚁道的存在对坝体的渗流特性和稳定性影响更大, 这与迎水坡水位及蚁道通风口位置密切相关。当水位低于蚁道通风口时, 蚁巢赋存下的渗流场和边坡稳定性变化规律与无蚁巢情况基本相同, 表明此时蚁巢系统对坝体的影响相对较小; 然而, 当水位上升至蚁道通风口时, 蚁道的大空隙特性促使水流优先通过该区域, 从而迅速抬升浸润线的位置, 进一步引起孔隙水压力的增加, 并破坏坝体的渗流场。随着孔隙水压力的上升, 有效应力降低, 导致坝体材料的抗剪强度下降, 从而增加了坝体变形的风险。此外, 研究还发现了蚁道直径对坝体位移场变化影响显著。

(3) 堤坝渗流分析模型对白蚁危害模拟的适用性探讨。有限元软件在堤坝渗流稳定性领域得到了广泛应用, 其模型能够精确模拟复杂的物理过程, 尤其对于难以通过传统试验手段深入探究的场景, 表现出极高的适用性。还能够对堤坝的不同区域和监测点进行分析^[15-20]。尽管如此, 有限元分析在应用时需要边界条件和材料参数进行一定程度的简化, 这可能会对分析结果的准确性产生影响。丁泽霖^[37]进行坝体材料物理力学性能的敏感性分析, 构建了胶凝砂砾石(CSG)坝结构模型, 并采用超载法进行破坏试验, 将试验结果与有限元模拟成果进行对比, 较好模拟了CSG坝的真实破坏情况, 表明了有限元模拟结果的可

靠性。本研究采用有限元软件对土石坝渗流进行数值模拟, 将模型输出结果与实际监测数据进行对比, 通过对坝体参数的率定与验证, 确保了参数选取的合理性, 提高了有限元软件分析结果的准确性。这表明, 结合监测数据或力学模型, 有限元软件能够准确地进行土石坝渗流分析。

堤坝蚁巢系统由蚁巢(主巢)、众多副巢及四通八达的蚁道组成, 对白蚁巢穴的主要结构的物理性质进行分析, 蚁巢系统整体上呈现出类似海绵结构的非规则几何体, 与周围的堤坝材料介质具有一定物理性质的差异性^[31]。在适当简化的条件下, 整个蚁道可以被视作一个具有两弯折头的自由出流短管系统, 进而构建一个水力-岩土计算模型^[38]。通过室内试验测定获取模型参数, 该水力-岩土计算模型的模拟准确率可以得到保证。鉴于此, 为了更精确地开展土石坝白蚁危害分析, 未来的研究中可以采用多种模型如力学模型加有限元分析相结合的方法。

(4) 研究的应用价值及白蚁防治建议。本研究揭示了不同蚁巢赋存及水位升降下对土石坝安全运行影响, 发现在水位发生变动时, 蚁巢系统的存在不仅改变了坝体的渗流场特性, 还可能引起局部强度的下降, 进而导致局部区域的沉降和位移不均衡, 并讨论了蚁巢的位置和尺寸、蚁道直径及水位升降速率变动对结论产生的影响, 从而拓展结论的适用性, 具有重要的应用价值。首先, 研究成果可以为土石坝的日常监测和维护提供科学依据, 帮助工程技术人员及时发现蚁巢危害并采取有效的防治措施, 对未来改进土石坝设计和白蚁危害防治措施制定具有重要意义。其次, 通过建立更精确的渗流分析模型, 可以更好地预测蚁巢对坝体的影响, 为土石坝的设计和加固提供参考。此外, 结合物探技术(如地质雷达和高密度电法)可以更准确地探测蚁巢位置, 提高防治效率。

白蚁防治建议包括: 一是蚁巢监测与早期预警。利用地质雷达、高密度电法等物探技术定期对土石坝进行监测, 及时发现蚁巢、蚁道的位置和分布情况, 并在土石坝的关键区域(如浸润线附近、上下游边坡)布置监测点, 实时监测孔隙水压力、浸润线位置等变化, 以便及时发现异常。最后结合水位变化规律和蚁巢位置, 建立预警模型, 当监测数据出现异常时及时发出警报。二是结合气候变化和自然灾害等因素, 开展更全面的环境适应性研究。三是工程措施与设计优化。在设计阶段, 考虑白蚁活动的可能性, 优化坝体的防渗结构, 增加坝体的抗渗能力, 并完善坝体的排水系统, 确保水位变化时坝体内部的孔隙水压

力能够快速释放, 减少因水位升降引起的坝体变形; 四是水位管理与应急措施。在水库运行过程中, 尽量避免水位的快速升降, 尤其是水位下降速率, 以减少对坝体渗流稳定性的影响。一旦发现蚁穴导致的渗漏或滑坡隐患, 及时采取应急加固措施, 如抛石固脚、反滤铺盖等。

5 结论

本研究深入探讨不同蚁巢赋存及库水位升降对土石坝各部位渗流特性、应力变形和稳定性的影响, 成果如下。

(1) 对坝体参数进行率定与验证, 评估模型结果的准确度。选取水位从 99.09 m~102.27 m 之间的监测数据与模型输出结果进行对比分析, 模拟值与监测值基本吻合, 验证了参数选取的合理性。

(2) 蚁巢系统显著改变了坝体的渗流特性。蚁巢系统在土体内部形成大孔隙通道, 提高了坝体的渗透性, 当水位上升至蚁道通风口位置时, 坝体浸润线特别是下游部位迅速上移, 并影响了土体的应力分布。在水位下降阶段, 相比于正常情况蚁巢系统则会延缓了浸润线的下降, 使浸润线长时间保持在较高水平, 导致坝体饱和区域增加, 不利于坝体的安全和稳定性。此外蚁巢尺寸和蚁道直径越大, 浸润线的下降速度越慢。

(3) 蚁巢系统对坝体孔隙水压力的影响呈现空间差异性。蚁巢赋存下坝体的孔隙水压力增速和峰值普遍高于正常情况, 尤其是在坝体下游部位, 相较之下上游边坡附近区域受到的影响相对较小。此外, 与坝体初始浸润线附近的监测点相比, 蚁巢系统的存在还会导致坝体内部的孔隙水压力变动提前, 这表明蚁巢系统会增强坝体内部区域孔隙水压力对水位变化的敏感性。而坝体下游部位的监测点则表明, 正常情况下的孔隙水压力对水位变化的响应较为有限。而在蚁巢赋存下孔隙水压力变化则与上游监测点的变化规律类似。

(4) 在位移场方面, 蚁巢系统主要影响坝体蚁巢系统以上的部位, 且随着水位的上升和下降, 其变形幅度逐渐增大和减小, 同时蚁巢尺寸和蚁道直径越大, 坝体的位移值越大。而正常情况下库水位升降对坝体应力变形的影响较为有限。处于蚁巢系统之上的区域受白蚁危害影响尤为显著。

(5) 蚁巢系统的存在对土石坝整体稳定性产生了负面影响, 设计洪水位下蚁道对坝体的稳定性影响更为显著。在水位上升阶段, 蚁巢赋存下坝体的安全系

数最初随水位的升高而增加, 当水位上升至蚁道通风口时安全系数出现了显著下降。之后, 两种情况下的安全系数变化规律一致, 至第 30 d, 水位降至最低点时, 两者的安全系数达到最小值, 而不同库水位升降中水位变化速度越快, 对坝坡稳定性越不利。

参考文献 (References):

- [1] 严军, 宋康杰, 徐海帆, 等. 小浪底水利枢纽土栖白蚁分飞试验[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024; 1-9. [2024-07-31]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-HBSL20240730001.htm>
- [2] 谭磊, 彭渊, 张平松, 等. 堤坝蚁巢综合物探技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(5): 7-15.
- [3] TAN L, PENG Y, ZHANG P S, et al. Research progress on integrated geophysical exploration technology for termite nests in embankments and dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(5): 7-15.
- [4] HASSAN B, NANDA M A. Detection and monitoring techniques of termites in buildings: A review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2024, 195: 105890.
- [5] 李栋, 庄天勇, 田伟金, 等. 白蚁管漏的成因及其治理[J]. 昆虫知识, 2001, 38(3): 182-185.
- [6] LI D, ZHUANG T Y, TIAN W J, et al. The origin of the termite pipe-teah formation on earth dikes and dams and its management[J]. Entomological Knowledge, 2001, 38(3): 182-185.
- [7] 周维. 水库堤坝白蚁防治研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [8] ZHOU W. Research on Termite Prevention and Control in Reservoir Dams[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2009.
- [9] WU D H, SEIBOLD S, FARNON ELLWOOD M D, et al. Differential effects of vegetation and climate on termite diversity and damage[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(12): 2922-2935.
- [10] 蔡勤学, 张树田, 屈章彬, 等. 黄河大堤河南段白蚁种类及分布调查[J]. 人民黄河, 2023, 45(5): 148-150.
- [11] CAI Q X, ZHANG S T, QU Z B, et al. Investigation of species and distribution of termites in the Yellow River dike in Henan section[J]. Yellow River, 2023, 45(5): 148-150.
- [12] 任书欣, 蔡勤学, 李国勇, 等. 基于环境因子的中国土栖性白蚁地理分布区划分析[J]. 昆虫学报, 2024, 67(6): 816-826.
- [13] REN S X, CAI Q X, LI G Y, et al. Analysis of the geographic distribution zoning of soil-dwelling termites in China based on environmental factors[J]. Acta Entomologica Sinica, 2024, 67(6): 816-826.
- [14] 李国英. 水利工程白蚁等害堤动物危害及防治调研报告[J]. 中

- 国水利, 2023(15): 1-5.
- LI Guoying. A study report on the hazard of termites and other pests to water structures and mitigation measures[J]. *China Water Resources*, 2023(15): 1-5.
- [10] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(3): 1-3.
- LI Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(3): 1-3.
- [11] ACHIRUL NANDA M, SEMINAR K B, NANDIKA D, et al. Development of termite detection system based on acoustic and temperature signals[J]. *Measurement*, 2019, 147: 106902.
- [12] YANG W C, XU K, LIAN J J, et al. Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 269-280.
- [13] WATANABE S, FUJISAKI S, HU C H. Numerical simulation of dam break flow impact on vertical cylinder by cumulant lattice Boltzmann method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(2): 185-194.
- [14] QIAO C J. Research on parameter spatialization and adaptive correction models in fluid numerical simulations[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2671.
- [15] SALAZAR F, TOLEDO M A, OÑATE E, et al. An empirical comparison of machine learning techniques for dam behaviour modelling[J]. *Structural Safety*, 2015, 56: 9-17.
- [16] LI M C, SI W, REN Q B, et al. An integrated method for evaluating and predicting long-term operation safety of concrete dams considering lag effect[J]. *Engineering with Computers*, 2021, 37(4): 2505-2519.
- [17] ZHANG M Z, ZHANG L, WANG X C, et al. A framework for seismic response analysis of dams using numerical source-to-structure simulation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2023, 52(3): 593-608.
- [18] ISSAKHOV A, ZHANDAULET Y. Numerical simulation of dam break waves on movable beds for various forms of the obstacle by VOF method[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(8): 2269-2289.
- [19] CARON P A, CRUCHAGA M A, LARRETEGUY A E. Sensitivity analysis of finite volume simulations of a breaking dam problem[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2015, 25(7): 1718-1745.
- [20] LIN H J, LI L, QIANG Y, et al. Sensitivity analysis of slope stability based on extreme gradient boosting and Shapley Additive Explanations: An exploratory study[J]. *Heliyon*, 2024, 10(16): e35871.
- [21] TAO Z G, ZHU C, ZHENG X H, et al. Slope stability evaluation and monitoring of Tonglushan ancient copper mine relics[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(8): 1687814018791707.
- [22] 张冲, 刘小强, 胡璇, 等. 叶巴滩水电站右岸坝肩高边坡变形机制分析与加固治理[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(3): 477-486.
- ZHANG C, LIU X Q, HU X, et al. Deformation mechanism analysis and reinforcement treatment of the high slope of the right bank dam shoulder of Yebatan Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(3): 477-486.
- [23] KUROKAWA F A, CORRÊA L, DE QUEIROZ R A B. Numerical simulation of 3D unsteady turbulent free surface flows using $\kappa-\epsilon$ model and ADBQUICKEST scheme[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(4): 202.
- [24] 杨鹏, 郑光, 黄金成, 等. 旭龙水电站库区格亚顶堆积体变形及稳定性分析[J]. *人民长江*, 2023, 54(9): 128-135.
- YANG Peng, ZHENG Guang, HUANG Jincheng, et al. Deformation and stability analysis of Geyading Accumulation Body in Xulong Hydropower Station reservoir area[J]. *Yangtze River of the People*, 2023, 54(9): 128-135.
- [25] LI Y, DONG Z Y, PAN D Z, et al. Effects of subterranean termite nest architectures on earth embankment seepage and stability[J]. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18(2): 367-384.
- [26] 侯彦钊. 蚁巢对土石坝渗流及稳定性影响分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- HOU Yanzhao. Analysis of Influence of Termite Nest on Seepage and Stability of Earth-rock Dam[J]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [27] 张宏亚, 盛松涛, 唐栋. 虹吸式蚁穴对堤防渗流稳定影响规律研究[J/OL]. *中国农村水利水电*, 2024: 1-14 [2024-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240731.1004.002.html>
- ZHANG Hongya, SHENG Songtao, TANG Dong. Study on the effects of Siphon-type termite nest architectures on earth embankment seepage and stability[J/OL]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024: 1-14 [2024-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20240731.1004.002.html>
- [28] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on Mike21: Taking Baiguishan reservoir as an example[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108802.
- [29] ZHANG Y Y, SHAO Q X, XIA J, et al. Changes of flow regimes and precipitation in Huai River Basin in the last half century[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(2): 246-257.
- [30] DIAO Y F, WANG B D. Risk analysis of flood control operation mode with forecast information based on a combination of risk sources[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(7): 1949-1956.
- [31] JÍLKOVÁ V, MATĚJČEK L, FROUZ J. Changes in the pH and other soil chemical parameters in soil surrounding wood ant (*Formica polyctena*) nests[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47

(1): 72-76.

- [32] 蔡邦华, 陈宁生, 陈安国, 等. 黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanus* (Shiraki)的蚁巢结构及其发展[J]. 昆虫学报, 1965, 14(1): 53-70.
CAI Banghua, CHEN Ningsheng, CHEN Anguo, et al. Architecture and development of the termitarium of *Odontotermes (o.) formosanus* (Shiraki)[J]. Acta Entomologica Sinica, 1965, 14(1): 53-70.
- [33] 刘源智, 唐国清, 潘演征, 等. 黑翅土白蚁初期单腔巢群建立 的观察[J]. 昆虫学报, 1981, 24(4): 361-366.
LIU Yuanzhi, TANG Guoqing, PAN Yanzheng, et al. Observations on the construction of the unilocular young nest of *Odontotermes formosanus* (Shiraki) [J]. Technical Supervision in Water Resources, 1981, 24(4): 361-366.
- [34] 牛来福, 张玉民. 虫穴对土石坝渗流规律分析[J]. 水利技术监督, 2023(11): 79-82.
NIU Laifu, ZHANG Yumin. Analysis of the effect of insect caves on seepage law of earth-rock dams[J]. Water Conservancy Technical Supervision, 2023(11): 79-82.
- [35] 纪娟. 白蚁巢对土石坝渗流影响分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(12): 105-109.
JI Juan. Analysis on influence of termite nest on seepage of earth rock dam[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2022, 5(12): 105-109.
- [36] 李颖. 堤坝蚁穴与盐土防蚁屏障水盐运移特征研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
LI Y. Study on the Characteristics of Water and Salt Transport of Subterranean Termite Nests and NaCl-laden Soil Barriers in an Earth Embankment[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [37] 丁泽霖, 魏新科, 王婧, 等. 水工结构材料模拟及CSG坝模型 应用[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 181-187.
DING Zelin, WEI Xinke, WANG Jing, et al. Modelling of hydraulic structure materials and application to Cementitious Sand Gravel Dam[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 181-187.
- [38] 高加成, 刘晓红, 甘新民. 堤坝蚁穴系统的水力-岩土模型及稳 定性[J]. 自然灾害学报, 2004(5): 55-61.
GAO Jiacheng, LIU Xiaohong, GAN Xinmin. Hydraulic-geotechnical model and stability of ant-nest system in dam[J]. Journal of Natural Disasters, 2004(5): 55-61.

(责任编辑 王 璐)