

侯博超,陈嘉雷,宋利祥.基于隐患探测及数值模拟的水库溃坝概率与直接经济风险分析[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于隐患探测及数值模拟的水库溃坝概率与直接经济风险分析

侯博超¹,陈嘉雷²,宋利祥²

(1.广东粤电南水发电有限责任公司,广东 韶关 512000;2.珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611)

摘要:水库溃坝概率及风险精准计算对防洪减灾具有重要意义。以南水水库为研究对象,基于事件树法拟定了2大类7条溃坝路径,采用三角模糊数表征各路径关键环节发生概率,并结合大坝隐患探测成果量化乐观系数,实现溃坝概率精确计算;构建水库下游一维河道—二维地表耦合数值模型并模拟了15种溃坝情景下淹没过程,结合水深—损失率曲线量化直接经济损失,进而根据“风险=概率×后果”框架综合评估直接经济风险。结果表明:南水水库主要隐患为大坝内部存在局部脱空或裂缝;水库综合溃坝概率为 2.00×10^{-5} ,其中路径1(坝体沉降导致漫顶)发生概率最高(6.43×10^{-6});同类溃坝情景下淹没面积差异小于20%,漫顶溃决淹没范围显著大于管涌溃决;溃坝直接经济风险为58743.17元,主要分布于高重现期荷载工况。研究可为水库溃坝概率与风险评估提供系统性、量化的新范式。

关键词:隐患探测;模糊事件树;数值模拟;溃坝概率;直接经济风险;南水水库

中图分类号:TV698.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-12

1 研究背景

中国已建成各类水库大坝近10万座,其中许多建于20世纪中叶的工程,受限于当时的技术与经济条件,普遍存在建设标准偏低、筑坝材料复杂、长期老化等问题,形成了大量病险水库,在极端洪水或地震荷载下易发生溃决^[1]。根据水利部大坝安全管理中心的相关普查数据,自1954—2021年间,中国累计发生溃坝事件3558起,平均每年溃坝数量约为52座,年均溃坝率为 5.3×10^{-4} ^[2]。溃坝作为低概率、高损失的极端事件,其风险分析的核心在于科学评估溃坝可能性和预测溃坝后果。然而,现有研究多结合设计图纸或常规监测数据,对坝体内部真实缺陷考虑不足,导致溃坝概率计算成果与实际情况存在偏差。

在溃坝概率分析方面,早期研究多采用历史统计法,但其适用性受数据库完备性的限制,随后基于事件树的逻辑模型成为主流^[3]。这些方法能够系统描述溃坝的因果链,但其精度严重依赖于底事件概率赋值的准确性。由于大坝失事的样本稀缺,以及坝体内部状态的不确定性,精确获取底事件概率十分困难。为此,部分学者^[4]引入了模糊数以处理这些认知不确定性,但在确定其乐观系数以获取准确概率时具有较大主观性。

在溃坝风险方面,目前学术界对风险的定义尚无统一标准,诸多学者^[5]认为风险是灾害发生概率及损失后果的组合。在溃坝后果评估方面,从早期的经验公式、一维模型发展到如今的一维—二维耦合水动力模型,模拟精度得到了极大提升^[6-8]。已有

基金项目:国家自然科学基金项目(42471022)

收稿日期:2026-01-14 修回日期:2026-02-25

作者简介:侯博超(1997—),男,主要从事水工建筑物安全监测等工作。

通信作者:宋利祥(1985—),男,正高级工程师,主要从事洪涝灾害防御方面研究。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

一些学者^[9-10]基于水动力模型和水深—损失率曲线对洪涝经济损失进行评估。然而,目前鲜有研究将概率计算与损失评估结合,实现水库溃坝风险的定量化综合评价。

针对上述不足,本文以南水水库为例,基于隐患探测数据确定模糊事件树中的乐观系数,量化溃坝概率;采用一维—二维耦合数值模型模拟淹没过程,结合水深—损失率曲线计算直接经济损失,最后根据“风险=概率×后果”的框架计算直接经济风险,以期为类似工程的风险管理提供参考。

2 研究对象及方法

2.1 南水水库大坝概况

南水水库位于乳源瑶族自治县洲街桥上游约 11.2 km 处,是一座以发电为主,结合改善防洪和灌溉等综合利用的大型水库。大坝采用定向爆破加以人工整理而成。1987 年大坝加高后最大坝高 81.3 m,坝顶高程为 225.9 m,防浪墙高 1.7 m,防浪墙顶高程为 227.6 m。斜墙体土料为南方高塑性土料,斜墙顶部高程为坝顶高程 225.9 m。大坝横剖面的材料分区,由上游坝面至下游为:斜墙迎水面混凝土盖板,垫层砂料层,粘土斜墙,反滤层 1.2~0.9 m,堆石体及下游坝面干砌石护坡。斜墙底部用帷幕灌浆与坝基连接,坝顶防浪墙底部嵌固在防渗墙内。此外,考虑人防要求,在上游放空极限水位 176.0 m 以下的上游坝面,还增设 8.0 m 石渣加强层,以增厚坝踵。大坝的中、下部主堆石体,由定向爆破抛射物堆积而成,约占堆石体总方量的 80%,堆积体平均高程约 195.0 m,上部堆石体由人工填筑而成。故上游形成较缓坝坡,其中坝高 50.0 m,范围的上游坡为 1:4~1:4.66,以上坝坡为 1:3~1:2.5。下游坝坡为 1:2~1:2.5。

2.2 模糊事件树法

为降低传统事件树法中底事件概率赋值的主观性,本文引入三角模糊数表征溃坝关键环节发生概率,并将隐患探测指标作为模糊数量化中乐观系数的取值依据。

a) 溃坝事件树构建。事件树法是一种系统安全

分析中常用的逻辑归纳与图示化方法,该方法以初始事件为起点,按照时间顺序与逻辑关系,系统构建事件发展的所有可能路径,并可通过赋予各环节的发生概率来定量评估不同路径的发生概率^[11]。综合分析南水水电站大坝的相关参数及历史运维情况,结合类似水库的溃坝模式,拟定南水水库的可能溃坝模式包括洪水漫顶导致溃坝和防渗体破坏导致溃坝 2 大类,共拟定 7 条溃坝路径,见表 1。

水库溃坝概率为 7 条路径的发生概率之和,特定路径下的发生概率可采用式(1)进行计算:

$$P_l = \sum_{i=1}^k (p_i \prod_{j=1}^s p(l, i, j)) \quad (1)$$

式中: P_l 为第 l 条路径的溃坝概率,路径共有 n 条; $p(l, i, j)$ 为第 l 条路径、第 i 种荷载、第 j 个环节的溃坝概率,荷载总数为 k ,环节总数为 s ; p_i 为第 i 种洪水/地震荷载的发生概率,本文结合南水水库特性参数,将荷载频率分为 1、10、100、1 000、5 000 a—遇共 5 种,对应频率区间分别为 0.1~1、0.01~0.1、0.001~0.01、0.0002~0.001、0~0.0002,各荷载状态发生概率等于各频率区间的上下限之差^[12],分别为 0.9、0.09、0.009、0.0008 和 0.0002。鉴于研究区地震活动性相对较低,且地震引起的大坝水位变化及溃口流量过程具有较大不确定性,本文主要考虑洪水荷载造成的溃坝淹没。

b) 溃坝概率计算。三角模糊数是模糊数学中的核心概念,主要用于量化与处理决策和评估中的不确定性、模糊性与主观判断信息^[13]。它通过一个三元组 (a, b, c) 来描述一个模糊量,其中 a 为下限估计值, b 为最可能估计值, c 为上限估计值。其隶属度函数在 b 点达到最大值 1,向两侧线性递减至 0,形成一个三角形。本次采用三角模糊数表征各溃坝路径中关键环节的发生概率 $p(l, i, j)$ 。式(1)中主要涉及三角模糊数的相乘计算,采用计算简便且在工程领域被广泛应用的标准近似法^[14]进行处理,见式(2):

$$(a_1, b_1, c_1) \cdot (a_2, b_2, c_2) = (a_1 \cdot a_2, b_1 \cdot b_2, c_1 \cdot c_2) \quad (2)$$

采用式(1)、(2),可将特定路径上所有环节的

表1 南水水库溃坝路径

Tab. 1 Dam failure paths of Nanshui Reservoir

溃坝类型	路径编号	核心故障	溃坝路径
漫顶溃决	路径1	坝体沉降导致漫顶	洪水或地震→坝体沉降→坝顶高程不足→漫顶→冲刷下游堆石体及反滤层→粘土斜墙失去支撑→斜墙坍塌→溃坝
	路径2	泄洪设施故障	洪水或地震→泄洪设施故障→库水位逼高至超防浪墙顶→漫顶→水流冲刷坝脚→反滤层与斜墙被掏空→干预无效→溃坝
	路径3	防浪墙与斜墙连接处破坏	洪水或地震→风浪冲击→防浪墙与粘土斜墙接触面渗漏或破坏→漫顶→水流沿斜墙背水侧下渗→冲刷砂垫层与反滤层→堆石体侵蚀→斜墙整体滑移→溃坝
	路径4	近坝库岸滑坡涌浪	洪水或地震→近坝库岸滑塌→涌浪→库水位瞬时壅高越顶→漫顶→冲刷坝体下游坡→干砌石护坡破坏→溃坝
	路径5	斜墙变形与渗透破坏	洪水或地震→堆石体不均匀沉降→粘土斜墙裂缝或与混凝土盖板脱开→渗流通道形成→反滤层失效→堆石体管涌→斜墙空洞化→整体失稳→溃坝
管涌溃决	路径6	坝基帷幕灌浆或防渗墙破坏	洪水或地震→坝基渗压异常→帷幕灌浆老化或地震破坏→坝基渗透破坏→绕渗加剧→下游坝坡失稳→干预无效→溃坝
	路径7	上游加强层失效	洪水或地震→人防石渣加强层被渗流冲刷→坝踵区域渗压升高→斜墙底部扬压力增大→斜墙与坝基脱开→集中渗漏→溃坝

三角模糊数连续相乘得到的新的三角模糊数,最终通过模糊数量化并与荷载发生概率相乘得到该路径溃坝概率。本文中模糊数量化手段采用Liou积分法^[15],该方法结合截集与模糊数的关联特性,针对LR型模糊数,通过计算其隶属函数反函数的积分来实现量化,见式(3):

$$p = \alpha J_L + (1 - \alpha) J_R \quad (3)$$

式中: p 为模糊数量化后的该环节发生概率; J_L, J_R 分别为模糊数左、右隶属函数的反函数的积分值; α 为乐观系数,根据水库隐患探测指标进行取值, $\alpha \in [0, 1]$,0代表完全悲观,1代表完全乐观。

2.3 大坝隐患探测

基于拟定的溃坝路径和核心隐患环节,对隐患相关的水库设施指标开展探测,共设定7大类11项指标,综合采用水准测量、高密度电法、地质雷达等多种方法确定指标等级(本文分I级、II级和III级),见表2。乐观系数目前尚无明确的取值标准,本文为避免完全乐观或悲观,I级、II级和III级对应的乐观系数分别取0.9、0.5和0.1。当一条路径有多个指标时,乐观系数取各指标乐观系数的平均值。

表2 大坝隐患探测指标、方法及分级

Tab. 2 Defect detection indicators, methods, and classification of the dam

关联路径	核心隐患	探测指标	探测方法	指标分级(由轻到重)
路径1	坝体沉降导致超高不足	①坝顶高程/沉降量	水准测量	I级(正常):沉降稳定,坝顶高程 > 设计值 II级(关注):局部沉降,坝顶高程 = 设计值 III级(严重):持续沉降,坝顶高程 < 设计值
		②爆破堆石体密度度/孔隙率	高密度电法	I级(密实):波速/电阻率正常,孔隙率 $n < n_{设计}$ II级(中等):存在局部低波速/电阻率异常区, $n \approx n_{设计}$

(表2 大坝隐患探测指标、方法及分级续表)

关联路径	核心隐患	探测指标	探测方法	指标分级(由轻到重)
路径2	泄洪设施故障	闸门启闭系统状态	机械与电气检测	Ⅲ级(疏松):存在大范围异常区, $n>$ 设计值
				I级(可靠):运行顺畅,无结构性损伤
路径3	防浪墙连接处破坏	防浪墙-斜墙连接完整性	外观检查	Ⅱ级(老化):存在卡涩、锈蚀,但功能正常
				Ⅲ级(故障):关键部件损坏,启闭功能失效
路径4	近坝库岸滑坡	近坝库岸稳定性	无人机航拍、边坡监测仪	I级(完好):连接紧密,无裂缝脱空
				Ⅱ级(缺陷):存在微裂缝或局部脱空(<2 cm)
路径5	斜墙变形与渗透破坏	①黏土斜墙完整性	高密度电法	Ⅲ级(破坏):贯通裂缝或明显脱空(>2 cm),有渗水迹象
				I级(稳定):岩体完整,无变形迹象
路径6	坝基帷幕/防渗墙破坏	②斜墙与混凝土盖板接触面	地质雷达	Ⅱ级(潜在不稳定):存在裂隙、局部崩塌体
				Ⅲ级(不稳定):有滑动面、持续变形,失稳风险高
路径7	上游加强层失效	石渣加强层完整性	水下地形测量	I级(完整):连续均匀,无裂缝
				Ⅱ级(隐患):存在局部裂缝(宽度 <1 cm)或疏松区
路径5	斜墙变形与渗透破坏	③反滤层有效性	渗透试验	Ⅲ级(破坏):存在贯通裂缝(宽度 >1 cm)或严重疏松区
				I级(密合):接触紧密,无渗漏通道
路径6	坝基帷幕/防渗墙破坏	②帷幕灌浆体完整性	CT透射法	Ⅱ级(轻微分离):存在局部脱空,渗流量微小
				Ⅲ级(严重分离):明显脱空,形成集中渗流通道
路径6	坝基帷幕/防渗墙破坏	②坝基渗流状态	渗压计监测	I级(有效):级配良好,渗透系数符合设计
				Ⅱ级(部分失效):局部淤堵或流失,功能部分下降
路径7	上游加强层失效	石渣加强层完整性	水下地形测量	Ⅲ级(失效):严重淤堵或流失,丧失保护功能
				I级(完好):单位吸水量 $\omega <$ 设计值
路径6	坝基帷幕/防渗墙破坏	②坝基渗流状态	渗压计监测	Ⅱ级(缺陷): ω 值超标,存在局部渗漏区
				Ⅲ级(破坏): ω 值严重超标,存在贯穿性渗漏通道
路径7	上游加强层失效	石渣加强层完整性	水下地形测量	I级(正常):渗流量稳定,扬压力低于设计值
				Ⅱ级(异常):渗流量增大或出现浑浊,扬压力升高
路径7	上游加强层失效	石渣加强层完整性	水下地形测量	Ⅲ级(危险):渗流量急剧增加、涌沙,扬压力接近临界值
				I级(完好):坡面平整,无冲沟
路径7	上游加强层失效	石渣加强层完整性	水下地形测量	Ⅱ级(侵蚀):坡面存在局部冲蚀坑
				Ⅲ级(破坏):坡面出现大规模冲沟或塌陷

2.4 溃坝淹没数值模拟

a)溃坝流量计算。南水水库大坝属土石坝,溃坝方式为逐渐溃,溃坝流量过程采用SL/Z 720—2015《水库大坝安全管理应急预案编制导则》推荐

的DL BREACH模型进行计算^[16-17]。

b)水库坝下洪水淹没模拟。采用珠江水利科学研究院自主研发的HydroMPM模型云平台^[18],构建南水水库下游一维河道—二维地表耦合水动力

模型,见图1。一维河道模型包含北江及南水河两条河道,上边界为北江孟洲坝水利枢纽及南水河南水水库坝下,下边界至北江飞来峡水利枢纽,总河长168.5 km,断面530个,平均断面间距约320 m。河道地形采用2019—2022年实测河道地形。二维地表模型根据河道建模范围向两侧分水岭进行拓展,共计1 718 km²。采用三角形网格对计算区域进

行剖分以拟合不规则河道边界,对河道两岸网格进行加密,最终剖分120 770个网格,最小面积约305 m²。一维河道模型和二维地表模型通过侧向耦合实现洪水漫堤演进及归槽计算,共计1 451个侧向耦合边界。模型上游边界采用水库下泄/溃坝洪水过程,下边界根据飞来峡水利枢纽调度规则计算得到水位过程。

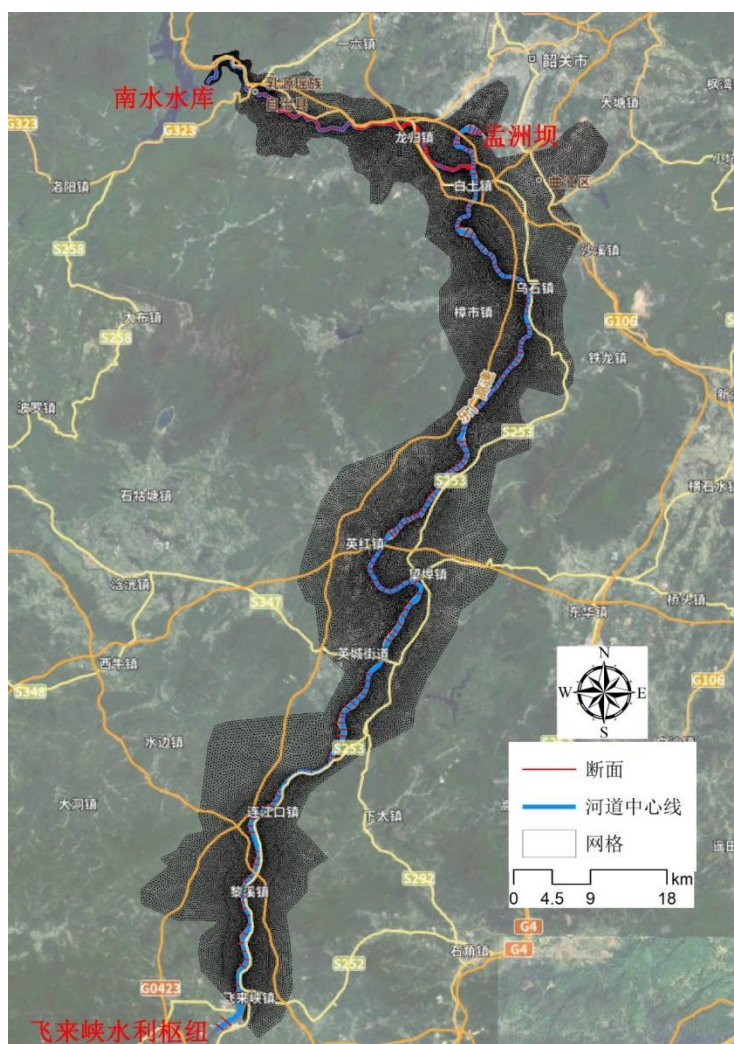


图1 南水水库下游一维河道—二维地表耦合水动力模型

Fig. 1 Coupled 1D river channel – 2D surface hydrodynamic model for the downstream area of Nanshui Reservoir

c)模型率定。2022年6月,华南地区连续出现4次强降雨过程,北江发生1915年以来最大洪水,北江流域英德、韶关等市受灾严重。本次采用此次洪水期间模型范围内英德站水位、濠湮水电站入库流量和飞来峡水利枢纽入库流量数据进行率定,结果

见图2。结果表明计算英德站最高水位与实测最高水位之差不大于20 cm,两水电站实测与计算最大入库流量的相对误差基本不大于10%,满足《洪水风险图编制和专项评估技术要求》等规程规范要求。

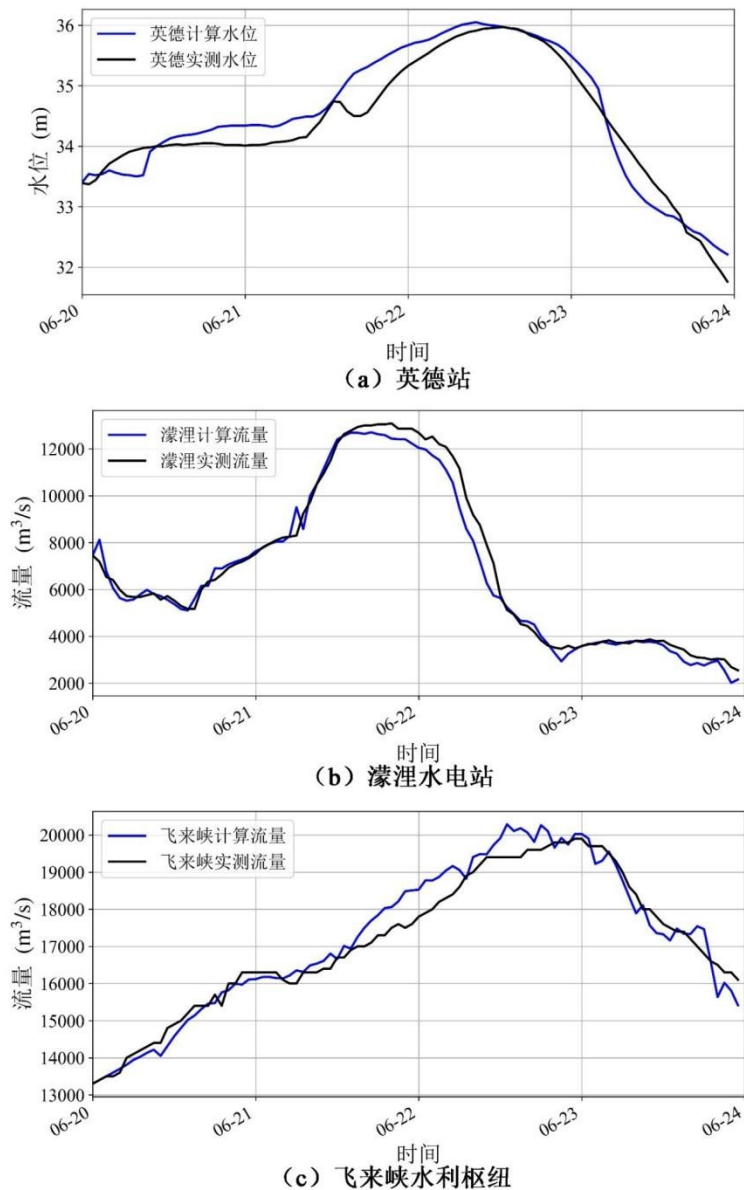


图2 水动力模型率定结果

Fig. 2 Calibration results of the hydrodynamic model

2.5 淹没损失评估

参考《洪水风险图编制和专项评估技术要求》，使用水利部发布的“洪水损失评估与避洪转移分析系统”，基于不同土地类型的水深—损失率曲线计算直接经济损失。水深—损失率曲线参考相关文献^[9,19]及2024年度广东省洪水风险图编制成果确定，结果见表3。根据区域调研情况，确定城镇、乡村房屋建筑单价分别为3 000、1 200元/m²；城镇、农村资产净值率为48%；城镇、农村家庭资产为650、450元/m²；国道、省道、县道、乡道、城市主干道、城市

次干道、高速公路道路单价分别为900、700、450、250、1 100、900、1 300万元/km；窄轨铁路、复线铁路单价分别为1 000、1 500万元/km。

3 结果与分析

3.1 水库隐患探测结果

采用高密度电法、雷达探测等多种技术手段，对7条溃坝路径关键隐患涉及的11项指标进行探测，结果见表4。从表4可见7项指标处于I级，表明南水水库大坝、闸门等结构维护情况较好，未出

表3 各土地类型水深—损失率(%)曲线
Tab. 3 Depth-loss rate (%) curves for various land use types

水深等级/m	家庭财产	家庭住房	农(林草)损失	工业资产	商业资产	铁路	省道及以上公路	省道以下公路
0.05~<0.5	0.5	0	20	0.2	0.5	0	0.3	1
0.5~<1.0	10	3	42	7	10	6	6	7
1.0~<2.0	27	17	60	22	20	15	16	20
2.0~<3.0	35	25	83	30	30	27	30	34
≥3.0	37	27	85	35	35	29	33	37

现易引起水库溃坝的重大隐患;4项指标处于Ⅱ级, 局部脱空或裂缝。对应乐观系数方面,除路径3外揭示的主要隐患在于大坝内部及结构连接处存在其他6条路径乐观系数均大于0.6。

表4 大坝隐患探测及乐观系数成果
Tab. 4 Results of dam defect detection and optimism coefficients

溃坝路径	探测指标	隐患探测结果	乐观系数
路径1	①坝顶高程/沉降量	I级(正常):沉降稳定,坝顶高程>设计值	0.7
	②爆破堆石体密实度/孔隙率	Ⅱ级(中等):存在局部低波速/电阻率异常区, $n \approx$ 设计值	
路径2	闸门启闭系统状态	I级(可靠):运行顺畅,无结构性损伤	0.9
路径3	防浪墙—斜墙连接完整性	Ⅱ级(缺陷):存在微裂缝或局部脱空(<2cm)	0.5
路径4	近坝库岸稳定性	I级(稳定):岩体完整,无变形迹象	0.9
路径5	①黏土斜墙完整性	Ⅱ级(隐患):存在局部裂缝(宽度<1cm)或疏松区	0.63
	②斜墙与混凝土盖板接触面	Ⅱ级(轻微分离):存在局部脱空,渗流量微小	
路径6	③反滤层有效性	I级(有效):级配良好,渗透系数符合设计	0.9
	①帷幕灌浆体完整性	I级(完好):单位吸水量 $\omega <$ 设计值	
路径7	②坝基渗流状态	I级(正常):渗流量稳定,扬压力低于设计值	0.9
	石渣加强层完整性	I级(完好):坡面平整,无冲沟	

3.2 溃坝概率计算结果

基于溃坝路径确定各路径关键故障环节,结合相关文献^[20-22]及专家经验对各洪水荷载下各环节发生概率赋予三角模糊数,最后根据表4中乐观系数成果对溃坝概率进行计算。以路径1为例,溃坝概率计算详情见表5,其他路径概率计算结果见表6。结果表明南水水库溃坝综合概率为 2.00×10^{-5} ,远低于中国水库平均溃坝概率(1954—2021年年均溃坝率 5.3×10^{-4} ^[21]);其中路径1(坝体沉降导致漫顶)是南水水库溃坝概率最高的路径,发生概率达到 6.43×10^{-6} 。

3.3 溃坝淹没计算结果

基于构建的一维河道—二维地表耦合数值模型对各路径、各洪水重现期下溃坝洪水淹没进行计算,并结合水深—损失率曲线量化各工况溃坝经济损失。

根据拟定的7条溃坝路径可知,路径1—4为漫顶溃决,路径5—7为管涌溃决。根据具体失效环节,路径1、3和4设定为各频率洪水调洪演算至最高水位时发生溃坝,路径2设定为水闸无法启动情况下库水位至坝顶时发生溃决,路径5—7则设定为调洪演算至最高水位时沿爆破堆积线发生管涌溃

表5 路径1溃坝概率计算结果

Tab. 5 Calculation results of dam failure probability for Path 1

荷载重现期/a	发生概率	乐观系数	核心环节发生概率			失事概率/ 10 ⁻⁶
			坝体沉降	漫顶	斜墙坍塌	
1	0.9	0.7	(0.0001, 0.00055, 0.001)	(0.01, 0.02, 0.03)	(0.01, 0.055, 0.1)	0.82
10	0.09	0.7	(0.0005, 0.00075, 0.001)	(0.01, 0.03, 0.05)	(0.05, 0.125, 0.2)	0.29
100	0.009	0.7	(0.001, 0.0055, 0.01)	(0.05, 0.075, 0.1)	(0.1, 0.2, 0.3)	0.84
1000	0.0008	0.7	(0.005, 0.0075, 0.01)	(0.1, 0.5, 0.9)	(0.2, 0.35, 0.5)	1.14
5000	0.0002	0.7	(0.01, 0.03, 0.05)	(0.5, 0.75, 1)	(0.5, 0.75, 1)	3.35
总计	1	—	—	—	—	6.43

表6 各路径溃坝概率计算成果

Tab. 6 Calculation results of dam failure probability for all paths

路径	不同荷载重现期下溃坝概率/10 ⁻⁶					P _i
	1a	10a	100a	1000a	5000a	
路径1	0.82	0.29	0.84	1.14	3.35	6.43
路径2	0.05	0.08	0.47	2.35	1.43	4.38
路径3	0.11	0.05	0.68	1.68	2.64	5.17
路径4	0.005	0.01	0.01	0.03	0.37	0.43
路径5	0.17	0.14	0.34	0.52	0.63	1.80
路径6	0.02	0.07	0.09	0.13	0.13	0.45
路径7	0.11	0.10	0.11	0.21	0.84	1.37
总计	—	—	—	—	—	20.02

决。综上,组合5种洪水频率后共计计算15种工况,各工况下不同水深淹没面积计算成果见表7。以路径1为例,10年一遇、100年一遇和1000年一遇淹没水深分布见图3。由结果可知同种溃坝类型下洪水重现期越大,淹没面积越大,但淹没面积差距基本在20%以内,说明下游淹没洪水主要来源于正常蓄水位以下库水;对比不同类型溃坝淹没成果可知漫坝淹没显著大于管涌淹没,其中路径2对应的泄洪设施故障导致洪水漫顶溃决淹没面积最大。

3.4 溃坝后果及直接经济风险分析

基于溃坝洪水淹没计算结果和水深—损失率曲线对各工况淹没直接经济损失进行计算,结果见表8。叠加各路径下洪水发生频率,完成水库下游

直接经济风险结果统计,见表9。由结果可知南水水库溃坝后造成的下游直接经济损失在20亿元以上,但由于溃坝概率较小,计算得到的下游直接经济风险为58 743.17元,其中主要淹没风险分布于1 000年一遇和5 000年一遇洪水工况,因此防范高重现期、低频率的洪水、地震极端事件是有效降低南水水库溃坝风险的重点。

4 结论

本研究针对南水水库溃坝概率与风险开展综合分析,基于隐患探测成果构建了模糊事件树模型,并结合一维河道—二维地表耦合水动力模型模拟溃坝洪水淹没过程,实现了溃坝概率、直接经济损失与风险的定量化评估,为水库溃坝风险评价提供了系统性、可量化、工程适用的新范式。主要结论如下:

a)南水水库多数结构指标处于正常状态,仅部分区域存在局部脱空或裂缝。除路径3外,其余路径乐观系数均高于0.6,反映大坝整体状况良好。

b)南水水库综合溃坝概率为 2.00×10^{-5} ,显著低于中国水库历史年均溃坝率,反映出其整体安全性较好。在7条溃坝路径中,路径1(坝体沉降导致漫顶)发生概率最高,达到 6.43×10^{-6} 。

c)同种溃坝类型下洪水重现期越大,淹没面积越大,但淹没面积差距基本在20%以内;漫坝淹没显著大于管涌淹没,其中路径2对应的泄洪设施故障导致洪水漫顶溃决淹没面积最大。

表7 各路径不同重现期洪水下各等级水深淹没面积

Tab. 7 Inundation area by water depth grade under different flood return periods for each path

对应溃坝路径	洪水重现期/a	各等级水深淹没面积/km ²					总计
		0.05~0.5 m	0.5~1 m	1~2 m	2~3 m	>3 m	
路径1、3、4	1	48.86	32.14	50.09	39.80	197.17	368.05
	10	48.43	33.20	47.85	41.53	211.59	382.60
	100	49.04	32.23	48.00	40.70	228.29	398.26
	1 000	46.67	32.53	46.52	39.86	245.28	410.85
	5 000	46.37	32.04	47.44	37.61	254.53	417.99
路径2	1	48.61	32.48	49.33	40.56	205.13	376.11
	10	48.62	32.63	47.66	41.65	215.47	386.03
	100	47.56	32.85	46.97	39.88	239.26	406.52
	1 000	46.57	32.69	46.59	39.57	247.06	412.47
	5 000	46.55	32.05	47.44	37.59	255.34	418.97
路径5、6、7	1	46.39	27.71	43.62	34.20	121.92	273.83
	10	47.70	29.27	45.11	35.40	136.24	293.72
	100	49.89	31.34	45.14	37.51	150.57	314.44
	1 000	50.23	33.67	46.75	38.20	167.99	336.84
	5 000	50.97	32.18	50.02	38.64	176.37	348.18

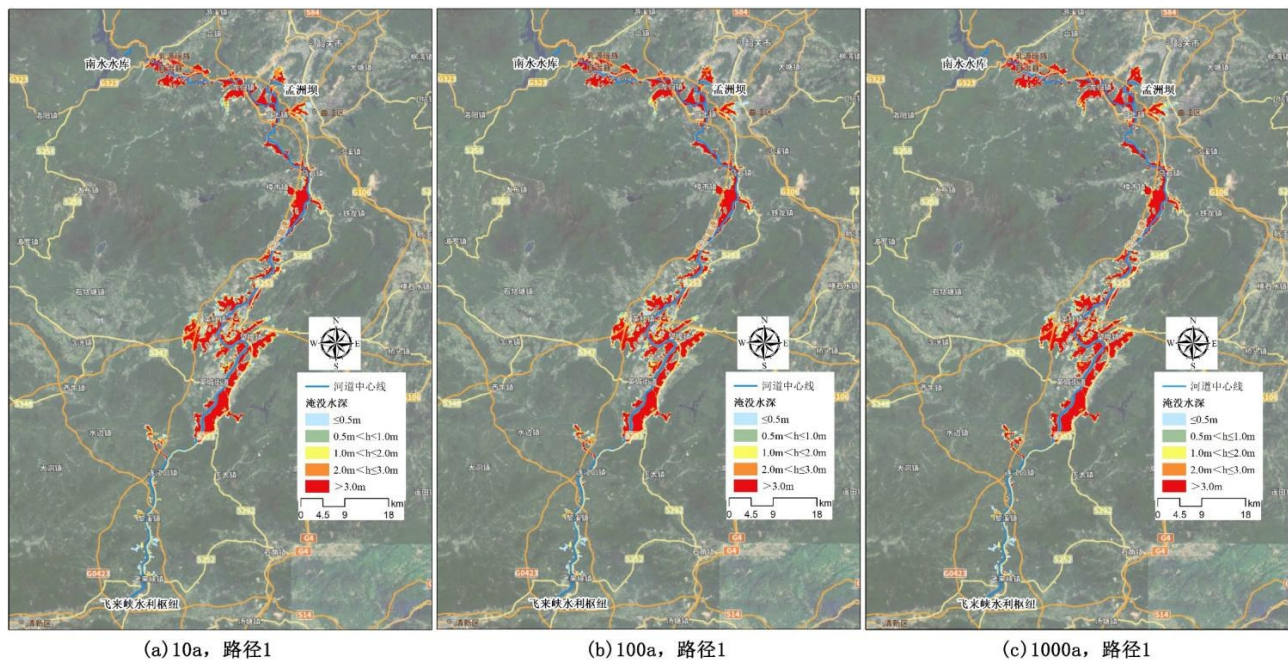


图3 路径1典型洪水重现期淹没水深分布

Fig. 3 Distribution map of inundation depth under typical flood return periods for Path 1

d)南水水库溃坝导致的下游直接经济损失均在20亿元以上,下游直接经济风险为58 743.17元。

经分析高重现期(1000a、5000a一遇)荷载工况贡献了主要风险,表明应重点防范极端洪水或地震

表8 各路径不同洪水重现期下溃坝导致的直接经济损失

Tab. 8 Direct economic losses from dam failure for each path under different flood return periods

路径	溃坝淹没损失/亿元				
	1 a	10 a	100 a	1 000 a	5 000 a
路径1、3、4	26.97	28.85	30.60	32.23	33.08
路径2	27.81	29.15	31.29	32.42	33.14
路径5、6、7	20.14	22.26	24.50	26.75	27.82

表9 各路径不同洪水重现期下溃坝导致的直接经济风险

Tab. 9 Direct economic risk from dam failure for each path under different flood return periods

路径	不同洪水重现期下经济风险/元					总计
	1 a	10 a	100 a	1 000 a	5000a	
路径1	2 211.23	836.77	2 570.02	3 674.08	11 082.31	18 163.18
路径2	139.03	233.21	1 470.51	7 619.57	4 739.46	14 062.75
路径3	296.63	144.27	2 080.50	5 414.43	8 733.52	16 372.72
路径4	13.48	28.85	30.60	96.69	1 224.02	1 380.15
路径5	342.37	311.61	832.84	1 391.12	1 752.55	4 288.12
路径6	40.28	155.81	220.46	347.78	361.64	1 085.68
路径7	221.53	222.58	269.45	561.80	2 336.73	3 390.56
总计	—	—	—	—	—	58 743.17

事件。

参考文献:

- [1] 张建云,杨正华,蒋金平. 我国水库大坝病险及溃决规律分析[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(12):1313-1320.
Zhang Jianyun, Yang Zhenghua, Jiang Jinping. An Analysis on Laws of Reservoir Dam Defects and Breaches in China [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(12): 1313-1320. (in Chinese)
- [2] 盛金保,李宏恩,盛韬桢. 中国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. 水利水电工程学报,2023(1):1-15.
Sheng Jinbao, Li Hongen, Sheng Taozhen. Statistical Analysis of Dam Failure and Its Loss of Life in China [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1):1-15. (in Chinese)
- [3] 王修伟. 土石坝失事模式判别及失事风险分析[D]. 郑州:郑州大学,2023.
Wang Xiwei. Identification of the Failure Mode and Failure Risk Analysis of Earth-rock Dams [D]. Zhengzhou: Zhengzhou

University, 2023. (in Chinese)

- [4] 肖智斌,周贤茂. 水库溃坝环节概率计算方法应用研究[J]. 山西建筑,2021,47(22):172-174.
Xiao Zhibin, Zhou Xianmao. Study on Application of Probability Calculation Method for Dam Break Link of Reservoir [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(22): 172-174. (in Chinese)
- [5] 黄崇福,刘安林,王野. 灾害风险基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报,2010,19(6):8-16.
Huang Chongfu, Liu Anlin, Wang Ye. A Discussion on Basic Definition of Disaster Risk [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(6): 8-16. (in Chinese)
- [6] 蒋林杰,付成华,程馨玉,等. 基于HEC-RAS的百花滩水电站溃坝洪水演进过程及影响分析[J]. 人民珠江,2021,42(1):65-72.
Jiang Linjie, Fu Chenghua, Cheng Xinyu, et al. Evolution Process and Impact Analysis of the Dam-break Flood of Baihuatan Hydropower Station Based on HEC-RAS [J]. Pearl River, 2021, 42(1): 65-72. (in Chinese)
- [7] 连志伟,程庆,宋利祥,等. 基于零维-二维耦合溃口流量计算模型的水库溃坝洪水模拟[J]. 人民珠江,2026,47(2):37-46.
Lian Zhiwei, Cheng Qing, Song Lixiang, et al. Reservoir Dam Failure-Oriented Flood Simulation Based on a Zero-Dimensional and Two-Dimensional Coupled Breach Flow Calculation Model [J]. Pearl River, 2026, 47(2): 37-46. (in Chinese)
- [8] 于子波,向衍,孟颖,等. 梯级水库连溃风险分析及洪水演进模拟[J]. 人民珠江,2021,42(8):11-16.
Yu Zibo, Xiang Yan, Meng Ying, et al. Risk Analysis of Sequential Dam Break of Cascade Reservoirs and Simulation of Flood Routing [J]. Pearl River, 2021, 42(8): 11-16. (in Chinese)
- [9] 黄国如,李碧琦. 基于InfoWorks ICM的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J]. 自然灾害学报,2021,30(2):71-79.
Huang Guoru, Li Biqi. Study on Indoor Property Loss of Shenzhen Residents Caused by Waterlogging Disaster Based on InfoWorks ICM [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(2): 71-79. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Dong Boliang, et al. Hydrodynamics-based Assessment of Flood Losses in an Urban District under Changing Environments [J]. Natural Hazards, 2024, 120(15): 14755-14783.
- [11] 李娜,赵然杭,付海军. 基于模糊数的事件树法在大坝风险分析中的应用研究[J]. 中国农村水利水电,2009(10):135-136,139.

- Li Na, Zhao Ranhang, Fu Haijun. Applied Research on the Event-tree Method Based on Fuzzy Numbers in Risk Analyses of Dams [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(10): 135–136, 139. (in Chinese)
- [12] 李大成, 张露澄, 马黎, 等. 西南某特高心墙堆石坝溃坝概率研究[J]. *水力发电*, 2023, 49(3): 46–51, 91.
- Li Dacheng, Zhang Lucheng, Ma Li, et al. Research on the Dam Failure Probability of an Extra-high Core Rockfill Dam in Southwest China [J]. *Water Power*, 2023, 49(3): 46–51, 91. (in Chinese)
- [13] 郭放, 崔毅, 陈梦璐. 基于三角模糊数和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性动态评价[J]. *人民珠江*, 2021, 42(6): 70–76, 84.
- Guo Fang, Cui Yi, Chen Menglu. Dynamic Evaluation of Regional Agricultural Drought Vulnerability Based on Triangular Fuzzy Number and Connection Number Coupling [J]. *Pearl River*, 2021, 42(6): 70–76, 84. (in Chinese)
- [14] Giachetti R E, Young R E. Analysis of the Error in the Standard Approximation Used for Multiplication of Triangular and Trapezoidal Fuzzy Numbers and the Development of a New Approximation[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 91(1): 1–13.
- [15] Liou T, Wang M J. Ranking fuzzy numbers with integral value [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 50(3): 247–255.
- [16] 周兴波, 王双敬, 杨子儒, 等. 基于DL Breach模型的堰塞湖溃决洪水分析[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(01): 68–72+78.
- Zhou Xingbo, Wang Shuangjing, Yang Ziru, et al. Analysis of barrier lake breach flood based on DL Breach model [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1): 68–72, 78. (in Chinese)
- [17] 刘凤茹, 赵显豪, 詹达美. 基于BREACH模型的某水库土坝溃坝分析研究[J]. *人民珠江*, 2021, 42(5): 86–92.
- Liu Fengru, Zhao Yuhao, Zhan Damei. Analysis of Earth Dam Break of a Reservoir Based on BREACH Model I [J]. *Pearl River*, 2021, 42(5): 86–92. (in Chinese)
- [18] 胡晓张, 宋利祥. *HydroMPM2D水动力及其伴生过程耦合数学模型原理与应用* [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- Hu Xiaozhang, Song Lixiang. *Principles and Applications of HydroMPM2D Hydrodynamic and Its Associated Process Coupling Mathematical Model* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2018. (in Chinese)
- [19] 乔贤玲, 侯精明, 张文晴, 等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(5): 73–81, 106.
- Qiao Xianling, Hou Jingming, Zhang Wenqing, et al. Community Scale Refined Simulation of Inundation Process of Houses and Indoor Property Loss Assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(5): 73–81, 106. (in Chinese)
- [20] 彭雪辉, 盛金保, 王昭升, 等. FMECA法在阿尔塔什面板堆石坝上的应用[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(S1): 27–32.
- Peng Xuehui, Sheng Jinbao, Wang Zhaosheng, et al. Application of FMECA Method to Concrete Face Rockfill Dam of Altash Water Control Project [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(S1): 27–32. (in Chinese)
- [21] Turkel A O, Zaifoglu H, Yanmaz A M. Probabilistic Modeling of Dam Failure Scenarios: A Case Study of Kanlikoy Dam in Cyprus [J]. *Natural Hazards*, 2024, 120(11): 10087–10117.
- [22] Montgomery M G, Yaw M B, Schwartz J S. Joint Failure Probability of Dams Based on Probabilistic Flood Hazard Analysis [J]. *Water*, 2024, 16(6). DOI:10.3390/w16060865.

Dam Failure Probability and Direct Economic Risk Analysis Based on Defect Detection and Numerical Simulation

HOU Bochao¹, CHEN Jiale², SONG Lixiang²

(1. Guangdong Power Group Nanshui Power Generation Co., Ltd., Shaoguan 512000, China; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Accurately estimating the probability and consequences of low-probability, catastrophic events such as dam failure remains a critical challenge. Existing studies on dam failure probability often insufficiently account for actual defects within the dam body and involve considerable subjectivity in assigning probabilities to basic events, leading to deviations between calculated and actual failure probabilities. Furthermore, few studies have integrated probability calculations with economic loss assessments to achieve a comprehensive quantitative evaluation of reservoir dam failure risk. Taking Nanshui Reservoir as the study object, two major categories comprising seven failure paths were established based on the event tree method. To reduce subjectivity in probability assignment,

triangular fuzzy numbers were introduced to represent the probability of key failure stages along each path, and defect detection indicators were used to determine the optimism coefficients in fuzzy number quantification, enabling precise failure probability estimation. A coupled one-dimensional river channel - two-dimensional surface hydrodynamic model for the downstream area was constructed using the HydroMPM model cloud platform and calibrated with water level and discharge data from the June 2022 flood event. The DL BREACH model was employed to simulate flood inundation processes under 15 dam failure scenarios across the seven failure paths. Direct economic losses were quantified using depth - loss rate curves, and direct economic risk was comprehensively evaluated within the "risk = probability \times consequences" framework. The results indicate that: ① Most structural indicators of Nanshui Reservoir are normal, with only localized voids or cracks in certain areas. Except for Path 3, the optimism coefficients for all other paths exceed 0.6, reflecting the dam's overall good condition. ② The comprehensive dam failure probability of Nanshui Reservoir is 2.00×10^{-5} , significantly lower than the historical annual average dam failure rate for reservoirs in China, indicating a high level of overall safety. Among the seven failure paths, Path 1 (overtopping due to dam settlement) exhibits the highest probability at 6.43×10^{-6} . ③ Under the same failure mode, inundation area increases with flood return period, but the variation across different return periods is generally within 20%. The inundation extent from overtopping failure is significantly larger than that from piping failure, with Path 2 (overtopping caused by flood discharge facility failure) producing the largest inundation area. ④ Direct economic losses from dam failure at Nanshui Reservoir all exceed 2 billion yuan, and the direct economic risk in the downstream area is 58,743.17 yuan. Analysis indicates that high-return-period (1000-year and 5000-year) loading conditions contribute the most to overall risk, suggesting that priority should be given to preventing extreme flood or earthquake events. This study provides a systematic and quantifiable new framework for dam failure probability and risk assessment.

Keywords: defect detection; fuzzy event tree; numerical simulation; dam failure probability; direct economic risk; Nanshui Reservoir

(责任编辑:程 茜)