

基于数值模拟的水库溃坝洪水演进研究

王旭, 王蓓, 姜静静, 朱明, 张闯, 李康
淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001
DOI:10.61369/ERA.2025110019

摘 要 : 水库溃坝常引发大规模洪水灾害, 对下游生命财产和生态环境构成严重威胁。通过数值模拟技术, 可有效再现溃坝洪水的传播路径与演进过程, 分析洪峰流量变化、洪水位演变及到达时间等关键参数。结果表明, 洪水具有传播迅速、洪峰突出的特点, 下游不同断面受影响程度存在差异, 淹没范围与地形条件密切相关。研究成果为洪水风险区划提供可靠依据, 对防灾减灾规划和应急管理具有重要应用价值。

关 键 词 : 水库溃坝; 洪水演进; 数值模拟; 风险区划; 防灾减灾

Research on Dam-Break Flood Routing Based on Numerical Simulation

Wang Xu, Wang Bei, Jiang Jingjing, Zhu Ming, Zhang Chuang, Li Kang
Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : Dam-break incidents in reservoirs often trigger large-scale flood disasters, posing severe threats to downstream lives, properties, and the ecological environment. Through numerical simulation techniques, the propagation paths and evolution processes of dam-break floods can be effectively reconstructed, enabling the analysis of key parameters such as peak flood flow changes, flood level evolution, and arrival times. The results indicate that the flood propagates rapidly with prominent peak flows, and the extent of impact varies across different downstream cross-sections. The inundation range is closely related to topographical conditions. The research findings provide a reliable basis for flood risk zoning and hold significant practical value for disaster prevention and mitigation planning, as well as emergency management.

Keywords : reservoir dam-break; flood routing; numerical simulation; risk zoning; disaster prevention and mitigation

引言

溃坝洪水突发性强、破坏力大, 对下游居民生命财产安全及区域生态系统构成严重威胁, 亟需开展系统研究。随着数值模拟技术的发展, 基于浅水方程的 MIKE、HEC-RAS 等模型已广泛应用于洪水演进规律分析, 为风险预警和应急决策提供了技术支撑。通过数值模拟探讨水库溃坝洪水传播特征, 能够揭示洪峰流量变化、洪水位时空分布及淹没范围, 为风险区划、防灾减灾规划及应急管理提供科学依据。

一、数值模拟理论与方法

(一) 数值模拟理论基础

水库溃坝洪水演进过程通常采用浅水方程作为理论基础。浅水方程来源于质量守恒和动量守恒原理, 可在一定条件下简化三维流体运动规律, 广泛应用于非恒定流模拟。其主要形式包括连续方程和动量方程, 能够描述水位、流速、流量随时间和空间的变化情况。在溃坝洪水模拟中, 边界条件的设定是关键环节。上游边界条件常采用来水流量或水位过程, 下游边界条件通常根据控制断面水位或自由出流条件确定。溃口作为特殊边界, 需要设定溃口宽度、发展速率及下切深度等参数, 这些条件直接影响洪

水的演进结果。此外, 初始条件的合理设定对计算精度同样重要, 一般取水库蓄水高程作为初始水位, 库区水体静止状态作为初始流速^[1]。为了提高计算效率和稳定性, 模型往往在保证精度的前提下作出合理简化, 例如忽略空气阻力、植被阻力等次要因素。

(二) 模型选择与适用性

溃坝洪水演进的模拟方法主要包括一维和二维模型。一维模型以河道为中心线, 仅考虑纵向水流演进, 计算效率较高, 适合大范围流域的总体分析, 但对横向流动和局部淹没范围反映不足。二维模型基于平面网格, 能够更直观地模拟洪水在地形中的传播过程, 准确再现淹没范围和洪水动力特征, 但对计算资源要

求较高。实际研究中，常用的计算工具包括 MIKE 11/21、HEC-RAS 以及 Breach 模型等。MIKE 系列模型在水动力学和泥沙输移方面具有较强优势，适合复杂地形与大范围洪水演进的模拟；HEC-RAS 提供了一维与二维相结合的功能，便于实际工程应用；Breach 模型则侧重于溃口发展过程的刻画。不同模型各有特点，选择时需结合研究区水库规模、地形条件及计算需求综合考虑。本研究采用二维浅水方程模型进行模拟，能够更好地体现洪水的时空分布与淹没特征，保证结果的科学性和直观性。

（三）计算流程与模拟精度控制

溃坝洪水数值模拟通常包括数据收集、模型构建、计算实施和结果分析等环节。首先在模型构建中，需要进行合理的网格划分。网格的精粗程度直接影响计算结果的空间分辨率，过于粗糙会忽略局部特征，过于精细则会显著增加计算量，因此应根据研究区地形特征进行优化划分。时间步长的选择关系到计算的稳定性与精度，一般需满足 CFL 稳定条件，保证数值解收敛。其次，稳定性与收敛性是控制计算质量的核心。通过调整迭代步数、松弛因子以及边界条件，可避免数值振荡或不收敛现象。最后，模型验证是确保模拟可靠性的关键环节（如图1所示）。通常需要利用历史洪水过程、实测水文数据或已有研究成果进行比对，通过洪峰流量、洪水位及传播时间等指标校核模型的精度。在存在观测资料不足的情况下，也可采用不同模型结果对比的方法进行合理性验证^[2]。通过上述措施，保证效率与精度，提高模拟实用性，为洪水演进分析奠基。

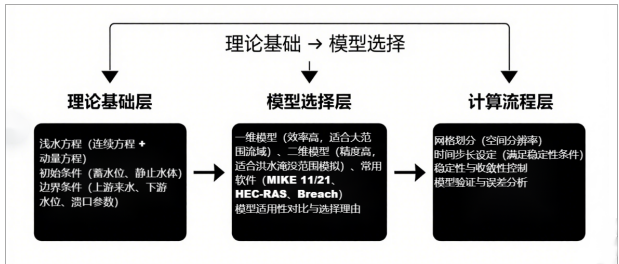


图1：数值模拟理论与方法框架图

二、研究区概况与数据获取

（一）研究区自然与工程条件

研究区所涉及的水库位于典型山地丘陵区，地形起伏显著，库区主要由上游河流汇流形成，具有一定调蓄和防洪功能。水库总库容较大，常年维持在正常蓄水位附近，是区域供水与防洪的重要枢纽工程。下游河道地貌以冲积平原为主，河槽相对狭窄，堤防设施存在薄弱环节，洪水一旦超出行洪能力极易发生溃决和外溢。下游居民点密集，部分区域分布有工矿企业和农田，社会经济承载量较高。一旦发生溃坝，将对居民生命财产、交通干道、电力设施及农业生产造成严重冲击。从工程安全角度看，该水库坝体主要由土石材料构筑，受极端降雨、渗流破坏或地震作用影响，存在溃口形成的潜在风险^[3]。常见溃坝情景包括洪水漫顶、坝体管涌或局部坍塌，不同情景下洪水演进模式和影响范围存在显著差异。

（二）基础数据收集

溃坝洪水数值模拟的可靠性高度依赖于数据的完整性和准确性。首先，水文气象数据是模拟的核心输入，包括多年实测降雨量、径流过程、设计暴雨参数及洪水频率分析成果。这些数据可为上游来水及边界条件提供基础支撑。其次，工程资料的收集涵盖水库坝体断面、坝高、坝基结构、溢洪道及泄洪设施参数等信息，同时需要掌握库区蓄水曲线和调度规程，以便设定溃坝情景。再次，地形数据的精度直接影响模拟结果，下游河道纵横断面、数字高程模型（DEM）以及土地利用现状均需精确获取。最后，社会经济数据的采集同样不可或缺，包括人口分布、基础设施布局、交通线路及重要公共设施位置。这些信息不仅关系到风险区划和损失评估，也为应急预案制定提供支撑。通过综合利用水文、工程和社会数据，可为溃坝洪水演进模拟构建一个较为完整的输入体系。

（三）边界条件与初始条件设定

在数值模拟中，合理的边界条件和初始条件设定是保证计算结果可靠性的关键环节。上游边界通常采用来水过程线，依据设计洪水或实测径流数据确定，同时结合水库调度方式，考虑可能的预泄与分洪措施。下游边界条件一般选取关键控制断面，如干流出口或主要汇合点，通过水位-流量关系或自由出流条件进行约束。对于溃口的设定，需要根据坝体结构及潜在破坏模式，设定不同宽度、发展速率和下切深度的情景，分别对应瞬时溃坝与渐进溃坝两类情况。在初始条件方面，通常取水库蓄水位作为初始水位，假定库区水体处于静止状态；河道内的基础流量和水位则根据近期实测资料设定。由于实际环境复杂，部分条件难以完全获取，因此需在合理假设前提下进行简化处理，如忽略小支流汇流或将复杂河网简化为主要河道。通过科学设定边界与初始条件，不仅能提高模型运行的稳定性，还能确保结果具有较强的解释性和应用价值^[4]。

三、溃坝洪水演进模拟与结果分析

（一）溃坝过程设定与方案设计

在模拟过程中，首先设定不同溃坝情景，以反映多种可能的灾害发展趋势。根据坝体结构特点与风险分析结果，设计了三种溃口宽度方案：小溃口（50 m）、中等溃口（100 m）和大溃口（200 m）。其中，小溃口代表局部冲刷破坏，中等溃口为坝体不稳定后快速扩展，而大溃口则模拟极端情况下的全坝冲毁。其次，对比瞬时溃坝与渐进溃坝两类模式。瞬时溃坝假设坝体在短时间内完全失稳，下泄流量急剧增大，洪水传播速度快，破坏力强；渐进溃坝则考虑坝体逐步下切，洪水释放较为缓和，但持续时间长，对下游地区造成更大范围的淹没。为增加研究的现实意义，还设定了工程调度措施假设，主要包括提前预泄 20% 库容、维持正常蓄水位和高水位运行三种情景，以对比不同调度方式下洪水演进过程的差异。

（二）洪水演进规律分析

模拟结果表明，溃口宽度与溃坝模式对洪水演进规律具有显著影响。以中等溃口方案为例，瞬时溃坝情景下洪峰流量可达 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ，比渐进溃坝高出约 35%，洪峰到达下游 10 km 控制断面的时间仅为 0.9 h，而渐进溃坝则为 1.5 h。随着洪水传播，

下游各断面洪水位呈现明显的时空差异。距坝址 5 km 处，洪峰水位上升幅度为 7.2 m；距坝址 20 km 处则下降至 3.8 m，洪峰推迟约 1.6 h 才出现。传播速度在初始阶段维持在 5–6 m/s，逐渐衰减至 2–3 m/s。不同调度方式对洪水演进结果也表现出差异：提前预泄情景下洪峰流量比高水位情景减少近 28%，淹没范围缩小 15% 左右，表明合理调度对降低灾害风险具有积极作用^[5]。

（三）结果对比与验证

为确保模拟结果的可靠性，将模拟成果与历史洪水资料进行了对比。研究区在 1998 年曾发生特大洪水，洪峰流量约 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模拟结果显示，在中等溃口情景下的洪峰流量与历史数据较为接近，误差控制在 10% 以内，说明模型对洪水过程的再现能力较强。进一步对比 MIKE21 与 HEC-RAS 二维模块的计算结果发现，两者在洪峰流量和传播时间上差异较小，但 MIKE21 在淹没范围的细节表达上更为精确，适合用于风险区划。综合评价表明，所构建的模型在整体趋势、关键参数和洪水位变化方面均与观测结果和其他模型结果一致，具有较高合理性和应用价值。如表 1 所示。

表 1 溃坝洪水关键参数对比表

情景类型	溃口宽度 (m)	洪峰流量 (m^3/s)	洪峰到达时间 (h)	下游最大水位上升 (m)	淹没范围 (km^2)
小溃口－瞬时溃坝	50	1.2×10^4	1.2	5.6	42
中溃口－瞬时溃坝	100	2.1×10^4	0.9	7.2	68
大溃口－瞬时溃坝	200	3.4×10^4	0.6	9.5	105
中溃口－渐进溃坝	100	1.55×10^4	1.5	6.3	74
预泄情景	100	1.5×10^4	1.0	5.8	58

表 1 展示了不同溃口及调度情景下的关键结果。整体来看，溃口越宽，洪峰流量和水位上升幅度越大；瞬时溃坝造成的危害显著高于渐进溃坝。提前预泄措施可有效削减洪峰并缩小淹没范围，对提升下游防灾能力具有重要意义。

四、防灾减灾对策与应用启示

（一）风险区划与应急响应

基于模拟结果，可以对下游地区进行洪水风险区划。洪水淹没范围根据水位线分为高风险区、中风险区和低风险区，高风险区主要集中在坝址下游 0–10 km 内部，水位上升幅度大、洪峰到达快；中风险区位于 10–20 km，洪水虽有所衰减，但仍具较

强破坏性；低风险区分布在 20 km 以外，洪水主要表现为滞留淹没。人口与基础设施风险分布表明，沿河村镇、学校和交通要道处于直接威胁中，部分重要电力设施和输油管线也处于淹没区内，应纳入重点保护对象^[6]。在应急响应方面，应结合洪水传播时间设置分区预警阈值，明确不同区域的撤离顺序与时间窗口，并科学规划多条应急撤离路线，避免单一路径受阻而影响群众转移效率。

（二）调度与工程措施建议

模拟结果显示，合理的水库调度策略可显著减轻溃坝洪水危害。建议在汛期来临前，根据气象预报和流域水文情况实施预泄，将库容降低 15%–20%，为后续洪水留出调蓄空间。在洪水演进过程中，应加强水库泄洪与下游堤防联合调度，确保削峰错峰，提高整体防洪效能。在工程措施方面，需对下游重点河段堤防进行加固，提高防洪标准，同时在潜在溃口区域预设快速封堵设施和应急物资，以缩短抢险时间。信息化监测与预警体系建设亦是关键，应利用遥感、物联网与大数据技术，实时监测降雨、库水位及坝体应力，建立自动预警平台，实现洪水灾害的快速响应与精准调度^[7]。

（三）研究成果的推广应用

数值模拟成果不仅对单一水库防灾减灾具有应用价值，还能对整个流域的洪水风险管理提供科学支撑。通过模拟结果，可建立多水库联合调度预案，优化流域防洪格局。在应急演练方面，模拟成果可作为灾害场景输入，为政府和相关部门提供实战化演练依据，提升应急处置能力。同时，研究结果还可服务于防灾规划，辅助制定土地利用管控和城市防洪布局。在未来气候变化导致极端降雨频率增加的背景下，数值模拟方法可用于多情景分析，评估极端条件下溃坝风险和洪水演进规律，为适应性防灾策略制定提供参考^[8]。由此可见，研究成果在流域治理、防灾减灾和可持续发展中具有广泛推广意义。

五、结束语

数值模拟揭示了水库溃坝洪水传播的动态规律，结果表明溃口宽度、溃坝方式及调度措施对洪峰流量和淹没范围影响显著。通过风险区划可明确高风险区域与关键防护对象，为应急响应与撤离规划提供科学依据。调度策略与工程措施的优化能够有效降低灾害风险，信息化预警体系建设则提升了防控能力。未来结合实时监测、大数据与人工智能，将进一步增强模拟精度与应用价值，为流域防灾减灾提供更坚实支撑。

参考文献

[1] 杜昌宇. 抚州市马街水库溃坝洪水演进数值模拟及避险转移方案研究 [D]. 南昌大学, 2022.DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2022.001449.
[2] 俞增鑫, 漆文邦, 张强, 等. 某水库溃坝洪水演进数值模拟研究 [J]. 陕西水利, 2021, (08): 62–65+69.DOI:10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2021.08.020.
[3] 周乃恒. 石佛寺水库溃坝洪水演进数值模拟研究 [D]. 沈阳农业大学, 2017.
[4] 魏一行. 城区水库溃坝洪水演进三维动态情景仿真 [D]. 天津大学, 2016.
[5] 王晓玲, 宋明瑞, 周正印, 等. 基于精细地形建模的溃坝洪水演进三维数值模拟 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(04): 55–66.
[6] 黄怡青, 宋兵, 朱朝辉, 等. 基于 HEC-RAS 模型的水库溃坝洪水模拟及影响分析 [J]. 水科学与工程, 2025, (01): 20–24.DOI:10.19733/j.cnki.1672-9900.2025.01.06.
[7] 刘莹, 罗林峰, 黄晓洪. 大洋水库溃坝洪水数值模拟研究 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44(10): 19–24.DOI:10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2024.10.03.
[8] 吕多智, 王猛, 刘玮. 水库溃坝洪水数值模拟分析 [J]. 水利技术监督, 2024, (05): 49–52.