

尾矿库溃坝数值模拟在桥梁风险评估中的运用及效果探析

李宇晨

广西工程技术研究有限公司

摘要: 在城市化建设进程中, 桥梁数量不断增加, 桥梁的建设质量和运行效果, 影响着区域经济发展, 需要有关部门做好桥梁风险评估工作, 掌握相关影响因素, 制定针对性的风险防控措施。其中尾矿库的存在, 增加了泥石流灾害发生概率, 极易出现桥梁崩塌事故。本文以提高桥梁运行的安全性为研究目标, 重点阐述了桥梁风险评估中尾矿库溃坝数值模拟的运用和效果, 并简单论述了桥梁事故类型等内容, 希望对相关工作有所帮助, 供参考。

关键词: 桥梁风险评估; 尾矿库; 溃坝数值模拟

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.15.035

引言

新时期, 我国公路建设里程逐年增加, 覆盖面积日渐扩大, 并且随着工程建设技术水平的提升, 桥梁风险预防和灾害防治成为重点, 不仅有利于桥梁稳定运行, 为人们出行提供便利, 还有助于减少工程损失。尾矿库属于一种由人类活动造成的泥石流危险源, 在其他因素的作用下发生泥石流, 增加了桥梁风险隐患。为此需要结合桥梁周边环境具体情况, 展开风险评估工作, 采用尾矿库溃坝数值模拟的方法, 根据评估结果制定预防措施。

一、桥梁事故类型和风险评估方法

(一) 事故类型

根据事故发生原因、损坏程度、各阶段特征等, 桥梁事故可分成多个类型。具体而言: 以事故造成责任方为依据, 桥梁事故形成原因包含维护原因、设计原因、施工原因、外部原因、其他原因等, 其中由尾矿库溃坝所形成的泥石流, 属于外部原因的一种。按照桥梁事故详情分类, 包括碰撞事故、大风事故、水力事故、地震事故等。同时, 按照桥梁全生命周期的各个阶段分类, 包括运行时期事故、维护时期事故、施工时期事故^[1]。

(二) 评估方法

评估桥梁风险时, 事件树分析法、安全检查表法、风险矩阵法、故障树分析法几种。其中安全检查表方法又可分成结果定量化、定性化、半定量化, 需要评估人员具备丰富的工作经验, 根据检查项目内容, 确定具体分值和系数, 再计算评价分值和得分情况, 以此客观地划分安全评价等级。选择故障树评价方法时, 通过带有方向的“树”绘制事故元素, 理清事故因果关系, 明确事故原因, 展开定量定性分析, 寻求解决最佳方法。采用风险矩阵法时, 借助二维表格, 划分风险损失等级、概率等级, 再针对性制定风险管控措施, 此种方法重点考虑风险损失、风险概率。

二、尾矿库溃坝常见模拟方法

现阶段, 模拟尾矿库溃坝常见方法包括以下两种, 具体而言: 一种为物理模型实验。按照一定比例尺缩小并制作地形地势图, 参考竖向比例尺、水平比例尺, 可采用变态模型或正态模型, 再依据相似原理, 选择符合要求的模型砂, 做到实时动态化模拟尾矿库溃坝过程。另一种为数值模拟, 借助大数据技术、计算机技术, 精准输入尾矿库溃坝相关数据, 制作符合实际情况地形模型图, 再通过数值计算软件和平台, 选用最恰当的数学模型。根据现有信息资源, 科学设置和明确边界条件、监测点、模型参数、初设条件等, 以图像显示的形式呈现尾矿库溃坝流程, 了解溃坝对下游建筑物造成的影响和具体范围。通过将物理模型实验与数值模拟两种方法相对比可知, 前一种模拟方法需要消耗较长的时间, 操作成本高, 且重复性差, 数值模拟方法更加灵活多变, 操作流程简单, 可以根据具体情况不断调整边界条件, 且经济性能良好^[2]。

三、尾矿库溃坝形成原因

(一) 失稳破坏

对于尾矿库来说, 坝体的稳定性与尾矿材料性质有关。若矿体稳定性较差, 内部出现滑移或者外表面沉陷情况。同时, 尾矿库堆积不合理, 也会造成失稳事故, 增加溃坝出现的概率。堆积状况具体表现为: 坝体的高度、容量、平均外坡比等。

(二) 漫顶溃决

当前, 尾矿库溃坝多由于洪水漫顶造成, 是多种因素相互作用的结果, 如排洪设施不完善、防洪标准不明确, 存在诸多弊端^[3]。实际工作过程中, 若相关部门未制定明确尾矿库防洪标准, 且部分基础设施损坏, 将导致洪水发生时, 水位高速上涨, 一旦超过坝体的承受范围, 造成漫顶溃决, 引发重大的安全事故, 如图1所示。



图1 尾矿库漫顶

(三) 结构破坏

尾矿库结构包括排洪结构、坝体结构，两种结构功能作用各不相同，但若其中某个结构被破坏，都会影响尾矿库的稳定性。坝体结构指尾矿库初期坝的一种，若结构被破坏将出现明显裂缝等，并且正常运行阶段病害也会逐渐扩大。结构破坏指标包括纵向、横向、水平等裂缝系数。

(四) 渗流破坏

当从机理角度出发分析尾矿库溃坝渗流破坏，分成接触流图、冲刷、管涌、流土形式。渗流破坏事故汛期出现概率大，由于汛期降雨量高，浸润线持续化增高，超过安全的限定范围。

四、桥梁风险评估中尾矿库溃坝数值模拟的实践运用

(一) 高速公路桥梁和尾矿库的基本情况

高速公路桥梁地理位置属于低山地貌，周围地势陡峭，相对高差明显，且周边分布着不同大小规模的尾矿库。根据实地调查研究显示，沿线共分布约30处尾矿库，直接影响着桥梁运行的安全性。其中为更好地分析尾矿库溃坝数值模拟的应用效果，以距离公路桥梁较近的尾矿库为例展开深入分析。桥梁基本情况为：属于T梁桥，桥墩直径为1.4米、1.8米，初步设计跨径40米。同时，尾矿库位于V形沟谷，全长1.14千米，平均宽度260米。

(二) 尾矿库溃坝数值模拟方法

分析尾矿库溃坝泥石流对桥梁运行影响时，可选用深度积分法，系统化分析和讨论径流特点、动力过程，并依据动量、质量方程计算，方程公式为：

$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y}$ ，式中v、u为y方向和x方向上的泥石流流动速度，h为流体的高度。求解方程时，选用有限差分方法，短时间内快速获得结果。

(三) 参数的选择

1. 泥石流容重

采用尾矿库溃坝数值模拟方法时，泥石流容重属于关键参数，决定着泥石流冲击力的大小，可选择现场测量法、查表法、理论推导法。以理论推导法为例，主要探讨泥石流颗粒含量、粒径大小、浆体容重等参数，再利用相关计算公式获得容重参数，公式为：

$$\gamma_c = 1 + \frac{\rho_s - 1}{1 + \frac{w(2s - \gamma_f)}{\gamma_f - 1}}$$

式中 γ_c 为流体容重、w为颗粒质量分数、 γ_f 为浆体容重、 ρ_s 为密度。另外，尾矿库溃坝事件多发生于每年汛期，或者由浸润线过高所造成的结构失稳，此种情况下尾矿砂处于饱和状态。其中溃坝导致的泥石流，应参考前期勘查结果，通过分析尾矿砂的饱和程度，再利用公式计算。为此展开前期地质勘查时，应利用专业工具和设备，逐一测量每层土层材料参数^[4]。如，素填土的天然重度、黏聚力、内摩擦角、饱和度等。

2. 摩擦系数

溃坝泥石流数值模拟过程中，地形数据精度、摩擦系数、泥石流容重都直接影响计算结果，其中摩擦系数属于关键影响因素。选择摩擦系数时，需重点考虑地面的粗糙程度、植被覆盖率、浆体的力学特性等等，再根据泥石流的特征以及数值模拟计算公式，遵守安全性评价原则，确定最佳的摩擦系数。

3. 其他参数

为确保桥梁风险评估结果的科学性，需要利用信息化软件和平台，系统化计算和分析坝高、堆积厚度、尾矿库的容量等，并进行反复校验，尽可能地减小测量误差，为数值模拟提供可靠数据。

(四) 数值模拟计算结果分析

1. 泥石流的方向

经深入计算结果可知，尾矿库溃坝所造成的泥石流，主要向沟谷西侧以及轴向流动，经过40秒后，尾矿砂大部分堆积在沟谷的西侧低洼处。

2. 泥石流速度

在尾矿库溃坝发生时，短时间内泥石流就以16m/s的速度行进，处于高速运行状态，对周边建筑物和基础设施都会带来严重损害。当泥石流进入沟谷区域，由于沟谷宽度的限制，促使泥石流能量消散速度较低，此阶段流速未发生明显变化。为此建设桥梁过程中，应选择跨度大的桥梁方案，降低泥石流对桥梁带来的影响。此外，经过15秒后流速逐渐减小。

3. 泥石流最大冲击高度

评估桥梁风险性过程中，泥石流最大冲击高度属于关键指标，需参考具体数值，制定可行性较高的桥梁风险预防控制措施。在尾矿库溃坝背景下，桥墩将受到泥石流较大的冲击力，浆体也会被冲起爬高，为防止浆体破坏桥梁的稳定性，应利用相关计算公式，确定泥石流的冲击高度，再设定桥梁下部净高度。公式为：

$$H = H_c + \Delta H = H_c + \frac{V_c^2}{2g}$$

式中 V_c 为流速、 H_c 为淹没深度、g为重力加速度，常数、 ΔH 为冲起高度、H为最大冲击高度。具体计算过程中，借助ArcGIS软件，按照上述公式计算，估算不同时间段泥石流的冲击高度。

4. 泥石流冲击力

通过查找相关资料可知，泥石流冲击力包括大石块和整体冲击部分，根据要求和规定计算。其中整体冲击力计算公式为：

$$\delta = \lambda \frac{W}{g} V_c^2 \sin \alpha$$

式中 λ 为构筑物的形状系数、 δ 为冲击力、g为常数重力加速度、 V_c 为流速、 α 为泥石流冲击方向与桥墩的夹角。在泥石流横向冲击力的作用下，桥墩横向稳定程度至关重要，应分析冲击力和横向倾覆力矩带来的影响。

$$F_s = \sqrt{\frac{3EJ V_c^2 W}{g L^3}} \sin \alpha$$

式中 α 为泥石流冲击方向与桥墩的夹角、W为石块的重点、 V_s 为石块速度、J为桥墩中心惯性矩、E为弹性模量、L为桥墩的高度。冲击力计算期间，也应重点分析

冲击力对桥墩底部施加的倾覆力矩。另外，由于大石块下落过程中，下落时间、速度、方向等受到多个因素的影响，导致计算结果具有较多的不确定性，为此需借助专业软件，从多个角度入手分析各种可能发生的情况。

（五）计算结果分析

经过以上深入分析可知，利用尾矿库溃坝数值模拟方法，能够快速分析桥梁哪些部位的安全隐患较高，对桥墩受力情况了解更加详细，针对性采取防护措施。同时，为充分掌握桥墩受力的不利条件，需要仔细计算和分析泥石流的速度和深度，将二者融合分析，探讨乘积最大时桥墩结构受到的最大冲击力，以此为依据优化桥梁结构，并能获得完整的桥梁风险分析报告。

五、尾矿库溃坝数值模拟下桥梁风险评估

展开桥梁风险评估时，合理化运用尾矿库溃坝数值模拟方法，有助于风险评估结果更加准确、可靠，并能构建完善的风险指标体系，明确风险评价标准，采取多元化的桥梁风险防控措施，突出风险评估的重要性。

（一）构建完善的风险指标体系

制定风险指标体系时，需参考尾矿库溃坝数值模拟结果，结合桥梁的基本情况，优化和整改指标体系内容。首先，根据现有资源整理和分析溃坝风险指标，明确风险因素；其次，依据数值模拟结果，分析溃坝引发泥石流的相关动力参数和条件；最后，整理溃坝对桥梁稳定性的影响，细化风险指标。另外，风险指标体系应包括输入参数、过程参数、输出参数。其中输入参数为溃坝风险指标，包括降水量、坝体抗滑能力、坝高、尾矿库的容量、日常管理水平、浸润线高程等等；过程参数为泥石流参数，包括大石块冲击力、流速、流深、整体冲击力；输出参数为桥梁风险损失指标，包括桥墩顶部最大位移、最大应力、冲击高度等。

（二）桥梁风险防控措施

桥梁风险评估工作的开展，主要为了提前制定合理化的风险防控措施，并能根据风险评估结果和桥梁周边具体情况，优化防控措施，最大程度上降低风险损害。鉴于此，制定桥梁风险防控措施时，应以尾矿库溃坝数值模拟结果为参考，降低风险发生概率，同时减小风险事件产生的损失。进行桥梁风险控制时，从风险回避、风险转移、损失控制、风险保留等方面入手，如处于桥梁工程设计阶段，优先考虑尾矿库管理情况，从源头入手，将风险损失控制在安全范围内。具体风险防控措施包括：

其一，优化设计。分析桥梁风险评估结果，按照风险等级和损失程度，优化工程设计方案。若发现风险等级和损失超过最大限制，桥梁存在极高的安全隐患，应依据数值模拟结果，重新规划或调整线路。或者调整桥梁结构类型，如设置隧道下穿施工方案、大跨桥施工方案，再与沟谷整治方案相融合。同时，在工程建设资金充足条件下，采用重力式防撞墩，此种墩台具有良好的抗冲击性能，更好地抵御泥石流^[5]。

其二，防护工程建设。在尾矿库溃坝的影响下，泥石流以较高流速冲击桥梁，若未加防护，极易带来严重的灾害事故。为此，应深入分析泥石流的特征，修建拦砂坝或者导流堤，拦砂坝的修建可拦截大量的固体物质，降低泥石流的流量、重量，逐渐缩小泥石流的规模，以此减小对桥梁的冲击力。此外，修建重力式拦砂坝时，最佳修建位置为沟谷狭窄区域，缝隙式拦砂坝适合地基坚固且平坦的区域。修建导流堤可以改变泥石流的流向和速度，将其冲击力控制在安全范围内，导流堤修建过程中，应以浆砌石、混凝土、钢筋为原材料，并精准计算地基的承载能力、抗倾覆等等。

其三，岸堤防护和整治沟谷。预防桥梁风险隐患时，采取整治沟谷和防护岸堤的预防措施，有助于提高边坡、河床的稳定性，降低泥石流侵蚀影响。相对来说，尾矿库溃坝泥石流的浆体组成部分，比由土体滑坡和洪水所引发的泥石流组成部分较为单一，且杂质充分混合，但在巨大冲击力的作用下，极易带动大块石移动。鉴于此，需要制定岸堤防护方案，让大块石处于稳定状态，并通过沟谷整治，减小泥石流的冲击速度、冲击力，处于桥梁可承受范围内。

总结

总而言之，在时代快速发展背景下，公路桥梁工程持续化增多，其中桥梁运行的安全性、稳定性，影响着区域经济发展脚步，需重视桥梁风险评估工作，根据评估结果和报告，制定可靠的风险预防方案，化解风险隐患。评估桥梁风险时，应立足于实际情况，正确运用尾矿库溃坝数值模拟方法，根据理论公式和模拟参数，计算不同位置的最大冲击高度，同时依据泥石流的流速和深度，分析溃坝对桥梁的影响，从而为桥梁风险防控提供参考。

参考文献

- [1]丁邦政.尾矿库溃坝数值模拟在桥梁风险评估中的应用[J].铁道勘测与设计,2021(4):44-49.
- [2]付博涛,李钢,张红,等.基于GDEM-PDyna的尾矿库溃坝三维数值模拟分析研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(2):71-77.
- [3]罗昌泰,李栋伟,余国平,等.模型试验及数值模拟下尾矿库溃坝尾砂流演变预测[J].振动与冲击,2022,41(3):307-315.
- [4]朱远乐,刘婷,王淇萱,等.某铁矿尾矿库溃坝砂流演进过程数值模拟研究[J].现代矿业,2022,38(4):167-171.
- [5]周薛森.基于动态模拟的尾矿库漫顶溃坝模型分析[J].山西建筑,2023,49(12):85-90.

作者简介:李宇晨(1992-),男,汉族,广西贵港人,本科,中级工程师,主要从事公路项目施工安全风险评估、安全评价、临建工程选址评估、双重预防机制建设、安全标准化建设、应急预案编制等工作。