

库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究

黄波林¹⁾, 殷跃平²⁾, 李滨³⁾, 冯万里¹⁾, 秦臻¹⁾, 张鹏¹⁾

1) 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北宜昌, 443002;

2) 中国地质环境监测院, 北京, 100081; 3) 中国地质科学院地质力学所, 北京, 100081

内容提要:强烈的人类工程扰动和水库蓄水作用导致地质灾害高易发区的水库城镇大多存在滑坡涌浪风险; 以往灾难性案例较多, 危害巨大。本文构建了以潜在涌浪源调查、变形破坏研究、涌浪危险性分析、脆弱性调查、风险评价和减灾对策分析等六个步骤为主的山区水库城镇滑坡涌浪风险评价技术框架流程。以三峡库区巫山县城为例, 遴选离县城最近的龙门寨危岩体进行技术示范。该柱状危岩体体积约 $30.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 当前处于欠稳定—基本稳定状态。颗粒-流体耦合数值模型分析显示在 145 m 和 175 m 水位工况下危岩体崩塌将分别产生最大约 17.9 m 和 11.6 m 的涌浪。巫山县城密集的码头船只和频繁的旅游船是主要承灾体。旅游船只暴露涌浪中的概率为 $3.4 \times 10^{-4}/\text{a}$, 超过可接受风险限值。景区码头和古城码头因涌浪而导致的潜在直接经济损失大(超过 200 万), 县城各大码头趸船人员具有高一极高风险。针对当前案例, 讨论了四种具体减灾方案。相关研究可为山区水库城镇防灾减灾提供技术支撑和借鉴。

关键词:山区城镇; 滑坡涌浪; 风险评价; 龙门寨危岩体; 三峡库区

山区城镇特殊的自然地理环境形成了以河流为基础和纽带的居民集聚体系(Xu Zhonghua et al., 2009)。山区水库修建后, 大量移民集镇采用就地后靠和集中居住的方式。例如三峡库区 2 座城市、11 座县城和 116 个集镇就地后靠建设在长江边; 向家坝库区搬迁 2 座县城、16 个集镇, 大部分也是迁建在金沙江边。由于强烈的人类工程活动和水库蓄水作用, 这些山区水库城镇和居民集聚地很多都存在地质灾害风险(Yin Yueping, 2013), 例如三峡库区巴东新县城因为滑坡问题而三次搬迁(Liu Chuanzheng, 2006)。

针对山区水库城镇存在的区域地质灾害风险, Xu Qiang et al. (2010) 以四川丹巴县城为例, 提出了县城地质灾害承灾体的调查方法, 构建了地质灾害易损性评价方法。Zhang Mosheng et al. (2019) 提出按 3 个层次不同比例尺精度进行山区城镇地质灾害调查与风险评价的思路。Peng Ling et al. (2015) 利用粗糙集理论和支持向量机模型分析了三峡地区山体滑坡的生命财产风险。考虑到单体滑

坡可能对城镇和人口密集区的危害, 许多学者进行精细分析。例如 Xiao Lili et al. (2020) 采用 Tsunami Squares 方法计算了孙家滑坡运动过程, 估算了人口与基础设施的脆弱性, 定量分析了最危险情景下的滑坡风险。Cojean et al. (2011) 分析了黄土坡滑坡与蓄水的关系, 提出了巴东新县城滑坡的风险。Giovanna et al. (2018) 调查研究了冲击意大利萨诺城区的泥石流, 提出了总体风险减灾框架和具体防护工程措施。Turner (2018) 基于速度与体积分析了滑坡对社会和环境的冲击影响, 提出了减灾的社会对策。

值得注意的是, 库区城镇还可能受到远端滑坡崩塌造成的涌浪袭击。水库或河、湖边的城镇遭受滑坡涌浪袭击的事件并不鲜见。“滑坡涌浪”中的“滑坡”是广义的滑坡概念, 包括滑坡、崩塌、碎屑流等斜坡岩土体失稳运动现象(Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 2010)。表 1 展示了国内外城镇遭受滑坡涌浪袭击的典型案列。滑坡涌浪危险性研究成果非常丰富, 从涌浪机制、传播

注: 本文为国家重点研发计划项目(编号 2018YFC1504806、2018YFC1504803)资助的成果。

收稿日期: 2020-04-23; 改回日期: 2020-08-18; 网络发表日期: 2020-10-27; 责任编辑: 张永双; 责任编辑: 黄敏、潘静。

作者简介: 黄波林, 男, 1979 年生。研究员, 博士生导师, 从事水库地质灾害及涌浪灾害方面研究。E-mail: bolinhuang@aliyun.com。

引用本文: 黄波林, 殷跃平, 李滨, 冯万里, 秦臻, 张鹏. 2021. 库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究. 地质学报, 95(6): 1949~1961, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021011.
Huang Bolin, Yin Yueping, Li Bin, Feng Wanli, Qin Zhen, Zhang Peng. 2021. Study of risk assessment and mitigation for landslide-induced impulse wave near towns in reservoir areas. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1949~1961.

消减到冲击致灾都有很大进展(Gorge et al. , 1979; Huang Bolin et al. , 2015, 2016, 2019b; Xing Aiguo et al. , 2016; Zhou Jiawen et al. , 2016)。滑坡涌浪风险研究则仍处在发展阶段。Ji Hong (2013) 以三峡库区云阳县为例,分析滑坡发生可能性和涌浪灾害影响因素的权重值,构建了区域滑坡涌浪灾害风险评估体系。Wang Fang et al. (2018) 以三峡库区万州区塘角 1 号滑坡为例,探讨了单体滑坡危险性分析方法和次生涌浪灾害承灾体易损性

评价方法。Huang Bolin et al. (2019a) 构建了水库区滑坡涌浪风险评估技术框架。Zeynep et al. (2016) 推荐了近海城镇的海啸风险评估工作标准步骤,并以西班牙 Cadiz 城为例进行示范。

地质灾害易发区的水库城镇遭受涌浪袭击的可能性大,例如三峡库区的巫山县城、水田坝镇和沙镇溪镇都遭受过灾难性的涌浪袭击(Huang Bolin et al. , 2015)。很多水库城镇遭受滑坡涌浪的风险依旧存在,山区水库城镇滑坡涌浪风险研究亟待加强。

表 1 国内外城镇遭受涌浪袭击典型案例列表

Table 1 List of typical cases of surge attacking on domestic and foreign towns

序号	城镇名	地质灾害名	特征
1	中国重庆巫山县城	红岩子滑坡	体积约 $23\times10^4\text{m}^3$ 。2015 年 6 月 23 日滑坡产生约 6 m 高的涌浪,造成了县城码头 13 艘船只翻沉和 2 人死亡(Huang Bolin et al. , 2019b)
2	意大利隆加罗内镇	瓦伊昂滑坡	体积约 $2.75\times10^8\text{m}^3$ 。1963 年 10 月 9 日滑坡产生高出大坝约 100 m 的水墙,造成 2000 多人死亡(Zaniboni et al. , 2019)
3	秘鲁琼加矿工地	琼加滑坡	体积约 $10\times10^4\text{m}^3$ 。1971 年 3 月 19 日崩塌产生了近 30 m 的涌浪,造成 400~600 人死亡(Zaniboni et al. , 2019)
4	中国贵州新湾村	福泉小坝滑坡	体积约为 $141\times10^4\text{m}^3$ 。2014 年 8 月 27 日滑坡产生 27 m 的涌浪,造成 23 人死亡,23 人受伤(Xing Aiguo et al. , 2016)

本文首先构建水库城镇滑坡涌浪风险评价流程与方法;然后以三峡库区巫山县城为例,分析临近县城的典型危岩体潜在涌浪危险性,研究县城及邻区承灾体脆弱性,划分县城涌浪高风险区域;最后讨论县城涌浪减灾方案,为山区水库城镇防灾减灾提供技术支撑。

1 风险评价流程与方法

我国水库滑坡涌浪危险或风险评估大多是针对特定滑坡或一些滑坡开展工作。针对城镇地质灾害危险或风险评估,则是围绕城镇开展工作的,要求威胁城镇的地质灾害及链式灾害都需要调查分析。这与美国、日本、新西兰等国家沿海港口和城镇为对象,评估它可能遭受的海啸风险一致(Sato et al. , 2003; Charalampakis et al. , 2007; Barberopoulou et al. , 2011)。由于海啸的产生/传播特点,海港及城市海啸风险可以从可能的涌浪源(海底滑坡及发震断裂)开始分析,或者直接从历史数据来分析海啸危害概率(Sato et al. , 2003; Charalampakis et al. , 2007; Barberopoulou et al. , 2011)。

本文建立的山区水库城集镇滑坡涌浪风险评价流程与上述思想类似,可以采用以下步骤和方法来实现(图 1):

(1)潜在涌浪源调查。围绕集镇调查河道上下游可能产生涌浪的地质灾害体(潜在涌浪源)。以集镇为原点,根据城集镇重要性和人口密集度调整调查半径;根据已有滑坡涌浪案例,一般影响区在 5~

10 km 左右(Huang Bolin et al. , 2019b)。因此调查半径一般可以考虑为 5~10 km 左右。当城集镇的上游存在大坝水库时,要考虑近坝滑坡产生漫坝的可能性(Zaniboni et al. , 2019)。

(2)地质灾害变形破坏研究。针对调查获得的地质灾害体进行变形破坏和稳定性分析,逐一甄别哪些地质体可能发生脆性破坏和高速运动,高速运动的岩土体并进入水体才可能产生涌浪,对这些地质灾害体分类建档。在三峡库区,岩层顺层滑移-剪断、逆向倾倒破坏、碎石堆积物滑动和高陡危岩体崩塌等破坏类型易发生高速运动,形成灾害性涌浪(Huang Bolin et al. , 2015)。

(3)滑坡涌浪危险性分析。针对可能产生涌浪的滑坡/崩塌,应该逐一预测分析各工况下潜在涌浪强烈程度。在地质灾害破坏模式基础上,构建合理的岩土体运动、流固耦合运动和水体运动的数学模型,分析地质灾害运动特征,预测岩土体产生的涌浪。根据涌浪分布,形成单体滑坡涌浪危险性分区图。

(4)潜在承灾体脆弱性调查。根据单体滑坡涌浪危险性分区图,调查滑坡涌浪危险性中等及以上级别的河道内潜在承灾体。调查对象包括暴露在涌浪范围内的永久及临时建筑物、公路/铁路/管线等线状工程、沿河码头/趸船、航道内流动船只,以及固定人员与流动人员的分布等(Huang Bolin et al. , 2018)。根据暴露于涌浪的情况和承灾体抵御能力进行定量或定性脆弱性分析,提出潜在的经济、人口

损失或相关损失概率。

(5)城集镇涌浪风险评价。根据单体滑坡涌浪危险程度和承灾体脆弱性,采用定性和定量方式进行城集镇承灾体涌浪风险评价,形成城集镇承灾体的风险区划图。针对每个可能危及城集镇的滑坡涌浪进行风险评价后,可形成各单体滑坡涌浪风险列表,对比揭示各单体地质灾害风险排序,形成城集镇承灾体的综合风险图。

(6)风险减灾对策分析。综合考虑承灾体风险情况,针对性提出风险消除、风险减轻和风险管控等措施。

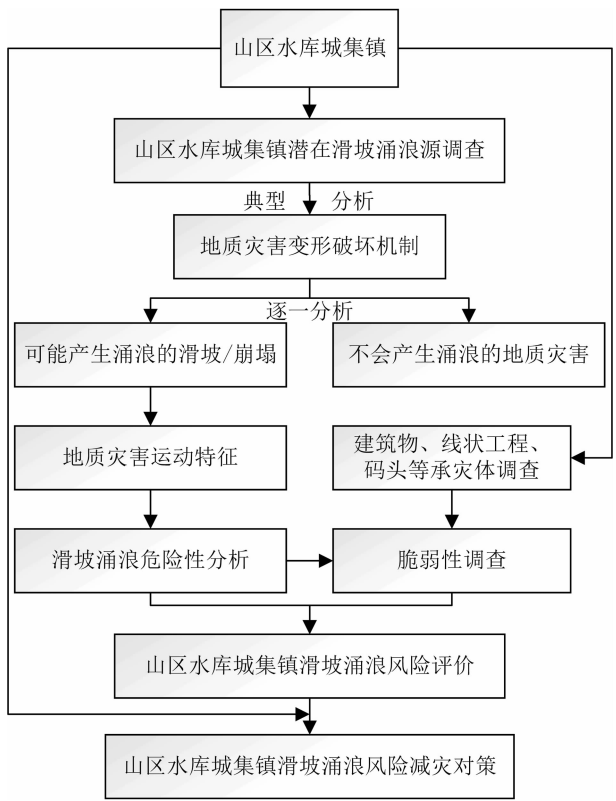


图 1 水库集镇滑坡涌浪风险评价流程图

Fig. 1 Flow chart for risk assessment of landslide-induced impulse wave near town in reservoir area

为了进一步说明所提出的水库城镇滑坡涌浪风险评价技术框架及相关方法,利用三峡库区的典型移民城镇案例来进行应用示范。危及城镇的潜在滑坡涌浪源可能不止一个,单多个地质灾害与单体的计算分析流程类同。限于篇幅,本文仅利用一个典型单体地质灾害进行示范。

2 典型案例应用分析

2.1 巫山县城及龙门寨危岩体概况

巫山县位于三峡库区重庆市东部,是渝东北门

户,县城地处大宁河和长江的交汇处。巫山县城是三峡库区就地后靠新建设的移民县城之一,县城建筑物基本为全新高标准修建,由于人多地少,建筑物高密度建设。巫峡县城址老滑坡众多,例如残联滑坡、秀峰寺滑坡等等;在新县城修建过程中已经进行了加固治理利用。

巫山县拥有巫峡神女峰、大宁河小三峡等等中外知名的景区,是著名旅游目的地。同时,由于三峡库区人多地少,移民就地安置以后靠为主。很多移民田地变少,兼或转为渔民。因此,县城沿大宁河 185 m 以下基本都沿江建设码头,以满足各类船只的停泊与管理工作。

2014 年以来,得益于旅游业的繁荣,巫山县经济快速发展,巫山新县城进入二次开发阶段。由于人多地少、土地资源紧张,大量山地斜坡被开挖和回填,导致形成了国宾酒店边坡失稳、金鸡岭滑坡和白杨湾滑坡等地质灾害(图 2)。2008 年 175 m 蓄水以来,龚家坊滑坡、红岩子滑坡和干井子滑坡等相继发生破坏。同时,长期的水位波动导致部分岸坡消落带岩体持续劣化。因为消落带岩体劣化松动,龚家坊-独龙段不稳定斜坡、龙门寨危岩体、青狮危岩体和龙柱危岩体近年来出现了一系列变形迹象。

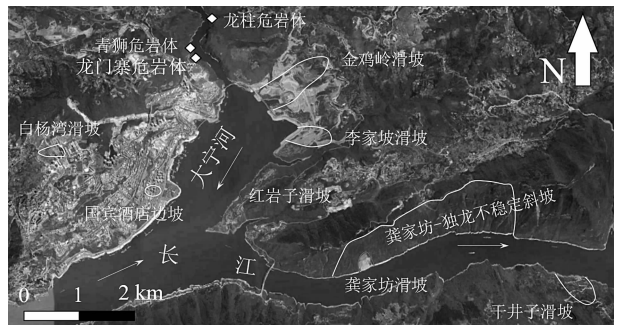


图 2 重庆巫山县城附近的主要地质灾害分布图

Fig. 2 Distribution map of main geological disasters near Wushan County, Chongqing

巫山县城具有三峡水库移民城镇的典型特点,即集群式的复建建筑物、密集的码头船只、繁荣的旅游业和高易发的地质灾害。因岩体劣化而新生或加速演化的地质灾害是当前三峡库区十分关注的问题(Chen Zuyu et al., 2019)。龙门寨危岩体是其中的典型案例之一,也是离巫山县城最近的危岩。

龙门寨危岩体地处长江支流大宁河小三峡的龙门峡右岸,距离龙门峡峡口约 660 m,龙门峡口下游就是巫山县城所在地(图 2)。该点与下游红岩子滑坡直线距离约 2.9 km,与巫峡龚家坊滑坡直线距离



图 3 龙门寨危岩体照片

Fig. 3 The global scene of Longmenzhai potential rockfall

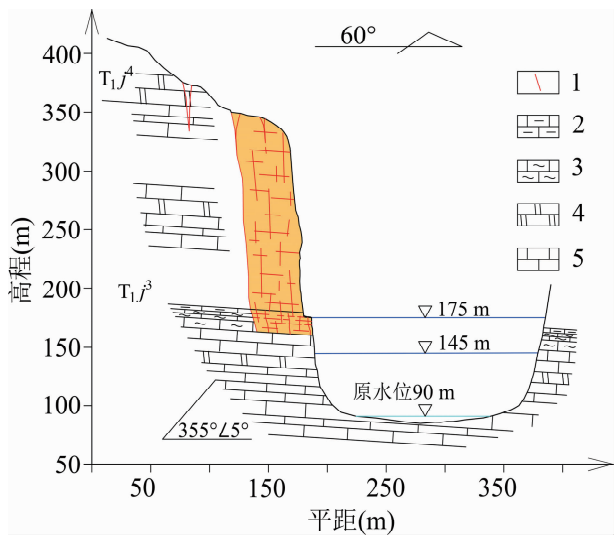


图 4 龙门寨危岩体剖面图

Fig. 4 Section map of Longmenzhai potential rockfall

- 1—裂缝;2—泥灰岩;3—灰泥灰岩;4—白云岩;5—灰岩
- 1—Fracture; 2—marl; 3—calcareous marl;
- 4—dolomite; 5—limestone

约 5.0 km。

龙门寨斜坡由三叠系嘉陵江组三段(T_1j^3)薄层—中层状灰泥灰岩、粒泥灰岩夹白云岩和嘉陵江组四段(T_1j^4)中厚层白云岩构成,基岩产状为 $355^\circ\angle 5^\circ$ 。构造上,处于巫山向斜和齐岳山背斜之间的龙门峡次级背斜的核部。地貌上,该斜坡为一坡度近直立的陡崖,朝向约 60° (图 3)。斜坡的最高山顶高程为 550 m,山顶较为平缓。该区河床高程约为 85 m,蓄水后河谷宽度约 190~200 m,为非常狭窄的 U 型峡谷。龙门寨危岩体位于该斜坡的下游侧,由 T_1j^3 组岩性构成(图 4),具有较明显的边界。

该危岩体的上游侧边界为一条大型张开的裂隙,裂隙从山顶贯穿至基座,走向 60° ,近直立。该

大型裂隙延伸长度约 180 m,张开约 2.3~0.1 m,局部有条状块石充填其中。下游侧边界上部为大型结构面形成的冲沟崖,下部为闭合的结构面,产状为 $320^\circ\angle 75^\circ$ 。危岩体下部发育一厚约 0.5 m 的灰质泥岩,形成了宽约 1~0.3 m 的小平台,植被发育。灰质泥岩下部为泥质灰岩陡崖,呈碎裂结构,垂向劈理发育。危岩体后缘被大型结构面切割,剥离母岩形成了陡坎,陡坎高约 2 m。危岩体内部明显存在 4 条纵向的平行上下游边界的裂缝(图 3),它们延伸长度不一,有的闭合,有的张开。局部岩块已经沿着这些裂缝发生了破坏。

在这些大型结构面的切割下,龙门寨危岩体后缘顶部高程约为 350 m,泥灰岩的底顶界高程约为 175~177 m,压裂区的底界高程约为 160 m。危岩体高度约为 190 m,平均宽度和厚度均约为 40 m,总体积约为 $30.4\times 10^4\text{ m}^3$ 。龙门寨危岩体的高宽比为 4.75,为典型的柱状危岩体(图 4)。由于基座岩体常年处于 145~175 m 水位变动带中,在应力-水-岩周期性作用下,基座岩体强度逐年下降。当前,160~177 m 间岩体的劈裂说明基座压力和水岩作用已经开始对基座岩体产生挤压破坏。当上部危岩体重量形成的压应力超过基座相对软弱岩体的抗压强度时,基座岩体被剪切、拉张、压裂并不断向外鼓胀挤出,上部岩体随之不断的下沉和倾倒,内部裂隙不断扩展,并最终发生压溃坐落破坏。崩塌发生时,多呈现为下沉-解体-滑动或倾倒等复杂的破坏运动。这一模式又被称为坐落式(Xu Gang et al., 2017)或鼓胀式崩塌(Hu Houtian, 1985),是一种复杂的崩塌模式。这一类型在西南山区和秦巴山区均有分布,例如重庆市南川区甄子岩崩塌等(He Kai et al., 2015)。

关于这类崩塌的稳定性,Terzaghi(1950)认为其基底软弱岩层的渐进式屈服导致了崩塌灾害的发生。Hu Houtian(1985)认为基座的鼓胀是这类崩塌的关键。因此,Hu Houtian(1985)提出这类危岩体的稳定性系数可根据公式(1)进行计算。

$$K = \frac{R_{\text{无}}}{W/A} = \frac{AR_{\text{无}}}{W}$$

(1)

式中: W 为上部岩体重量(N); A 为上部岩体的底面积, (m^2) $R_{\text{无}}$ 为下部基座岩体的无侧限抗压强度(Pa)。

根据相关调(勘)查资料和《地质灾害防治工程勘察规范(DB50/143—2003)》,当前 145 m 工况下基座泥灰岩岩体无侧限抗压强度,可取为 5.8 MPa。

危岩体的底面积约为 1900 m^2 ,危岩体的自重约为 $8.7\times10^9\text{ N}$ 。公式(1)计算结果表明,145 m 工况下龙门寨危岩体稳定性系数 K 为 1.27。从 DB50/143—2003 中典型滑移式、倾倒式或坠落式的危岩稳定性评判标准来看,当前龙门寨危岩体处于欠稳定-基本稳定状态,与实际情况相符。

但是,考虑到周期性水位波动下基座岩体强度逐年下降,其稳定状态也会逐年变差。Zhang Zhihua et al. (2018)对箭穿洞危岩体基座压裂区泥质条带灰岩的干湿循环试验表明,岩石单轴抗压强度每年下降约 $0.8\%\sim1\%$ 。假定龙门寨基座泥灰岩岩体的单轴抗压强度每年下降也约为 0.8% ,则经过约 30 年后,龙门寨危岩体稳定性系数下降至 1.0 左右,危岩体处于临界状态。然而,地质灾害稳定状态的下降并非线性下降,它具有灾变的非线性加速过程 (Tang Minggao et al., 2003)。同时,175 m 工况下基座岩体处于淹没状态,基座的抗压强度较 145 m 工况下低一些,相应的稳定性系数降低至 1.0 要快一些。因此,龙门寨危岩体在可见的未来会发生强烈变形破坏。

龙门寨危岩体所在的大宁河小三峡河段是国际知名景区;危岩体距离县城不足 1 km;龙门寨危岩体在岩体劣化作用下显现变形迹象;它的崩塌可能强烈冲击水体,产生巨大涌浪。这些都显示龙门寨危岩体潜在涌浪灾害危及巫山县城及邻区,值得重点关注。

2.2 涌浪危险性分析

对于这种鼓胀式柱状岩体破坏产生的涌浪问题,尚无有效的经验公式和物理试验公式开展预测,刚体-流体耦合模型较难以真实反映碎屑流动及涌浪效应,而物理试验方法耗时耗费巨大。因此,本次研究采用了颗粒-流体耦合模型。这一模型模拟岩土体解体后碎屑运动造成的涌浪十分有效 (Huang Bolin et al., 2016)。

利用颗粒-流体耦合数值模型,构建了龙门寨危岩体崩塌产生涌浪的计算模型(图 5)。该计算模型长 7280 m,宽 3580 m,高 305 m。采用 $10\text{ m}\times10\text{ m}$ 的网格进行离散,共计 7818720 个网格单元。计算模型包括有约 7 km 长的大宁河河道和 3.5 km 长的长江河道,能够满足潜在涌浪对巫山县城和龙门峡航道等主要危害对象的影响评估。由于计算模型的平面四个方向均有河道,因此 X 和 Y 的四个方向边界均设置为外流边界。垂直方向的 Z —方向为墙边界, $Z+$ 方向为自由液面边界。根据龚

家坊、箭穿洞等相同岩性碎屑颗粒的性质 (Huang Bolin et al., 2016),模拟龙门寨危岩体的物质参数均采用如下的颗粒参数:颗粒堆积密度为 2860 kg/m^3 ,颗粒粒径为 0.3 m,摩擦角和休止角分别为 29° 和 32° ,颗粒的弹性恢复系数为 0.2。龙门寨危岩体初始时为静止态的原始柱状,初始水面亦为静止状态。计算工况设计为 145 m 和 175 m 两个水位工况。模型始终处于重力作用下运行 ($g=9.8\text{ m/s}^2$),耦合计算时长 300 s。

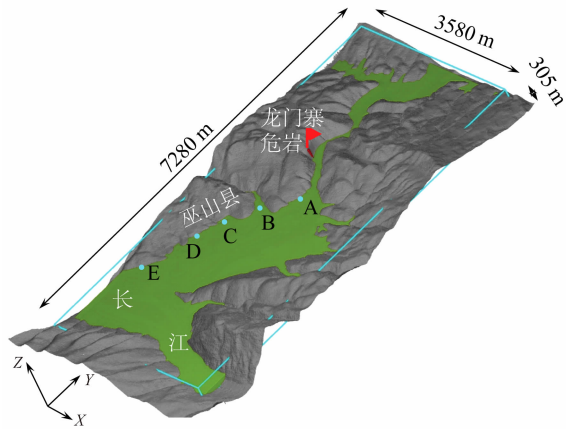


图 5 龙门寨崩塌流固耦合数值模型

Fig. 5 Numerical model of fluid-solid coupling for Longmenzhai rockfall

A—景区码头;B—货船码头;C—古城码头;D—旅游码头;E—海事码头
A—Scenic wharf; B—cargo wharf; C—gucheng wharf;
D—tourist terminal; E—maritime terminal

从柱体崩塌形态过程来看,碎屑进入河谷后呈明显扇形运动-堆积(图 6)。从平均速度来看,入水处的速度最能代表崩塌碎屑物冲击水体的速度。图 7 是两个水位工况下入水处的速度过程曲线。碎屑物质在前 10 s 快速运动,10 s 左右达到最大速度;两个工况下分别达到 31.7 m/s 和 21.1 m/s 。达到最大速度后,崩塌碎屑物质进入速度快速下降过程;约 20 s 后均进入缓慢的运动过程中。根据物理试验现象来看,此时碎屑物质进入到了表层流动阶段或停止阶段;亦即大部分物质已经停止运动,仅表层碎屑物质仍然在调整流动。

重庆甄子岩崩塌是柱状危岩体鼓胀式崩塌的真实案例。甄子岩 2004 年 8 月 12 日发生崩塌,He Kai et al. (2019)分析的最大速度约为 50 m/s ,甄子岩的柱高 250 m,厚度约为 30 m,高厚比为 8.3。龙门寨的柱高 190 m,厚度约为 40 m,高厚比为 4.75。对柱状危岩体,高厚比对速度有主要的控制作用。龙门寨危岩体高厚比和高差均小于甄子岩,

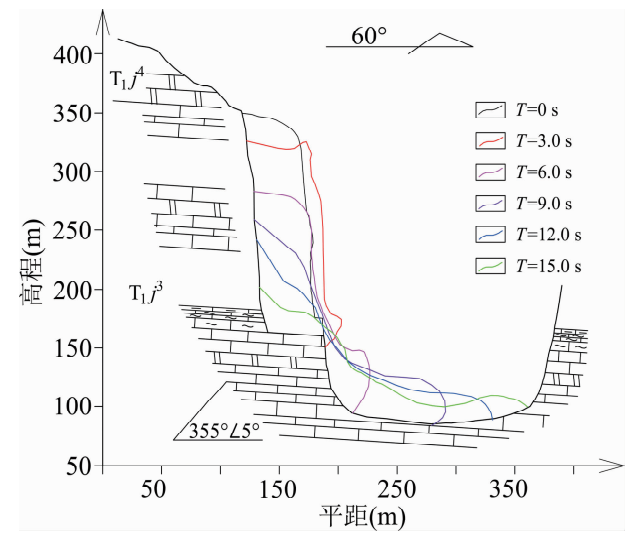


图 6 145 m 水位工况下龙门寨崩塌过程图
Fig. 6 Diagram of Longmenzhai collapse process under 145 m water level condition

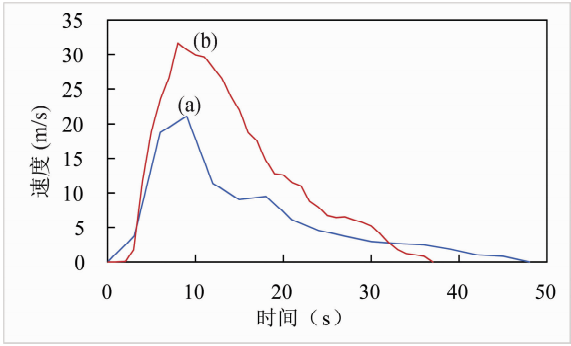


图 7 龙门寨危岩体崩塌碎屑运动速度图
Fig. 7 Velocity diagram of collapse debris movement of Longmenzhai rockfall

(a)—175 m 工况入水处;(b)—145 m 工况入水处

(a)—The spot entering water in the working condition of 175 m water level; (b)—the spot entering water in the working condition of 145 m water level

速度应小于 50 m/s。同时,坡脚存在地表水,这也会降低碎屑流的速度。线性对比两者的高厚比和速度值,本次计算所得的最大速度具有合理性和可靠性。

表 2 统计了两种工况下巫山县城若干重要码头位置的最大爬坡浪高。这些位置除了海事码头位于大宁河与长江的交汇处外,其他码头均位于大宁河内。除海事码头外,其他码头最大爬坡浪高都大于 1 m。巫山县城对岸红岩子滑坡涌浪抵达这些码头时最大爬坡浪高为 1.9~6.2 m;长江下游 4 km 的龚家坊滑坡涌浪抵达这些码头时最大爬坡浪高为 1~2 m(Huang Bolin et al., 2015)。

这 2 个真实涌浪案例中,均有船只受损或翻沉。因此,龙门寨危岩体产生的涌浪会对这些码头的船只造成危害。

根据中国岩石力学与工程学会《滑坡涌浪危险性评估》团体标准(送审稿)(Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, 2019)的相关规定,对龙门寨危岩体两种工况下的涌浪危险程度进行划分。浪高大于 2 m 的河道划为极高危险区,浪高在 1.5~2 m 之间的河道划分很高危险区,浪高在 1~1.5 m 之间的河道划为高危险区,浪高在 0.5~1 m 之间的河道划为中危险区,浪高低于 0.5 m 的河道划为低危险区。对 2 个工况下计算河道内最大涌浪高度进行了危险性区划(图 8)。

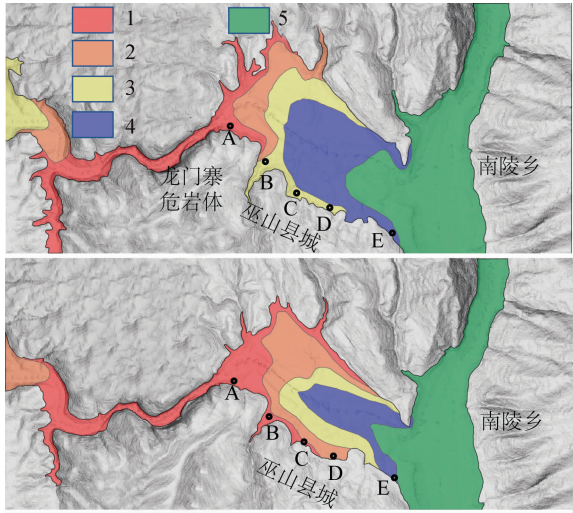


图 8 龙门寨危岩体潜在涌浪危险程度分区图
Fig. 8 Zoning hazard map of potential impulse wave generated by Longmenzhai rockfall

A—景区码头;B—货船码头;C—古城码头;D—旅游码头;
E—海事码头;(a)—175 m 水位工况;(b)—145 m 水位工况

A—Scenic wharf; B—cargo wharf; C—gucheng wharf; D—tourist terminal; E—maritime terminal; 1—extremely high hazardous zone; 2—very high hazardous zone; 3—high hazardous zone; 4—very high hazardous zone; 5—low hazardous zone; (a)—the spot entering water in the working condition of 175 m water level; (b)—the spot entering water in the working condition of 145 m water level

从图 8 来看,龙门寨危岩体产生的涌浪不会对长江干流造成较大的影响,都处于低危险区。大宁河的龙门峡段基本为极高危险区和很高危险区。在龙门峡出口,有近 2.8 km 长的开阔河面,涌浪衰减很快,涌浪危险程度也快速下降。但总体来看,大宁河的两岸涌浪危险程度较高;县城沿岸码头均处于高危险区内。

表 2 巫山县城重要码头各场景下滑坡涌浪过程特征值统计表

Table 2 Statistical table of characteristic values of impulse wave in each scene at wharfs in Wushan County

水位工况 (m)	最大涌浪值(m)	最大爬高值(m)	最大爬坡浪高(m)				
			景区码头	货船码头	古城码头	旅游码头	海事码头
145	17.9	27.5	10.9	2.3	2.3	1.6	0.8
175	11.6	15.2	3.8	1.1	1.1	1.0	0.7

2.3 涌浪风险性分析

涌浪和爬高都只反映了涌浪的强烈程度和危险程度,并不代表涌浪风险。对滑坡涌浪的风险评价,需要考虑暴露在涌浪危险下的承灾体脆弱性(Huang Bolin et al., 2018)。需要注意的是,本次研究的涌浪风险是指没有相关预警条件下突发崩塌产生涌浪的风险,同时不考虑崩塌的发生概率问题。

由于巫山县城临江建筑物的高程都高于 185 m,建筑物基本都没有暴露在涌浪中。因此,与红岩子和龚家坊滑坡涌浪类似,龙门寨崩塌涌浪的主要威胁对象是航道内行驶的船只、县城码头停泊的船只和趸船等各种船只。

对航道行驶船舶要考虑其暴露在涌浪下的时空概率问题。由于旅游具有明显的季节性,大宁河内航行船只也具有明显季节性。按每年旅游旺季统计航行船只和游客人数,每日进出大宁河的人数可达 3500 人左右,进龙门峡的船只约 20 艘大型观光船。由于观光往返时间约 2 h,观光船一般在 9:00~15:00 之间进入龙门峡,以保证晚上不通航。按平均分布来假定这些船只的运行,则每小时有约 3 艘船进入龙门峡,亦即每 20 min 有一艘观光船进入龙门峡。观光船的航速约为 20 km/h,即这些船仅有 10 min 在龙门峡内。龙门峡内有观光船的时间总共为 180 min。因此,在白天龙门峡内有船的时间概率约为 $180/(60\times 12)=0.25$ 。那么,1 年中龙门寨崩塌时有船的概率为 $\frac{1}{365}\times\frac{1}{2}\times 0.25=3.4\times 10^{-4}$ 。由图 8 和表 3 可知,龙门峡内浪高在 1.5~27.5 m 之间。由于观光船只基本没有抗浪能力;当暴露在高危险性涌浪中时,基本会翻沉。1 艘观光船的游客约 150~200 人,这些人暴露在涌浪下的风险概率约为 $3.4\times 10^{-4}/a$ 。那么这个风险是否可以接受呢?

表 3 龙门峡涌浪袭击下各码头的经济损失情况估算表

Table 3 Estimation of economic losses of wharfs under the wave attack of Longmenxia

水位工况 (m)	船只经济损失(万元)					
	景区码头	货船码头	古城码头	旅游码头	海事码头	合计
145	97.0	23.2	103.7	24.6	0.2	248.5
175	28.9	4.8	21.4	6.4	0.0	61.6

当前滑坡涌浪风险评价还处于发展状态,其可接受风险标准可以参考滑坡或其他灾害的可接受风险问题。英国健康与安全委员会(Health and Safety Executive)认为水库安全的个人风险上限为 $10^{-4}/a$;50 人或大于 50 人的社会可接受风险上限为 $10^{-6}/a$ (HSE, 2001)。荷兰防洪技术咨询委员会(Dutch Technical Advisory Committee on Water Defences)设置个人风险可接受标准上限为 $10^{-4}/a$ (Jonkman et al., 2003)。澳大利亚地质力学学会(Australian Geomechanics Society)针对现有边坡的可接受风险为 $10^{-5}/a$ (AGS, 2007)。Zhao Zhou et al. (2011)分析了 2007~2010 年间我国地质灾害威胁人口年平均伤亡率,建议中国地质灾害个人生命最大可接受风险为 $10^{-6}/a$,最大可容忍风险为 $10^{-4}/a$ 。GB/T 21714.2—2015 规定人身伤亡损失的风险容许典型值 R_T 为 $10^{-5}/a$ 。国家安全监管总局公告 2014 年第 13 号文件提出了我国个人可接受风险标准(The Third Supervision Department of State Administration of Safety, 2014),当在人群高密度场所(人数 ≥ 100 人),新建装置每年可接受风险概率为 $\leq 3\times 10^{-7}$;在役装置每年可接受风险概率为 $\leq 3\times 10^{-6}$ 。

由此可见,世界范围内个人可接受风险值在 $10^{-4}\sim 10^{-6}$ 之间,当风险值小于 10^{-6} 后才是可忍受风险。本次计算得到风险概率值 $3.4\times 10^{-4}/a$ 貌似处于个人可接受风险值的边缘。但是,这一风险概率值为群体的风险概率,与个人风险概率明显不一样;应该与群体社会可接受风险标准进行对照。简单理解群体和个人风险概率后果就会发现,当这一群体概率发生时,会出现 150~200 人左右的群死群伤事件。对照国内相关群体的可接受风险限值可知,观光船及游客暴露在涌浪的风险概率高于一般可接受风险标准,不会被公众所接受,具有高脆弱性。

同时,在龙门峡下游巫山县城所在河段也存在零星航行船只;它们大多是朝码头航行,准备停泊的船只。尽管这些非常少的航行船只也一样存在风险概率;但航行区处于中危险区和低危险区,在此均认

为它们处于可接受风险标准内,具有低脆弱性。长江干流尽管船只也较多,但始终处于低危险区内。因此,也可认为它们处于可接受风险标准内,具有低脆弱性。

从涌浪危险程度图上来看,除了航行船只这种流动的承灾体外,龙门寨崩塌产生的涌浪还会极大地危及巫山县城停靠船只的安全。按照停靠船只类型和大小,可将这些船只分为货船、客船/游轮、趸船和渔船等四类。同时,在每天的各时刻巫山县城各码头停靠的船只也是变化的。

本次收集了2014年7月31日、2017年4月30日、2018年8月14日和2019年10月16日的四期高精度遥感影像数据,对这些遥感影像上的各类船只进行了统计。数据来源于Google earth、Map world和World view,精度超过0.5m。从统计数据来看(图9),巫山县城各码头总的船只数量在252~330艘之间,平均约291艘。从A至E各码头停靠船只的平均数分别为20、32、143、63和33。除了货运码头只有货船和渔船停靠外,其他码头都是各类船只混杂停泊。从这个县城停靠船只的数量组成来看,渔船占55.6%,客船占32.8%,货船占4.6%,趸船占7%。这些类型船只的大小、价值和载人数

量不一,抵抗涌浪的能力及其脆弱性也不一样。

三峡工程蓄水后,红岩子滑坡涌浪和龚家坊滑坡涌浪曾冲击巫山县城码头船只,造成巨大经济损失。根据这2个案例,可大致回归建立整个县城码头经济损失与最大爬高的线性关系如下:

$$V_b = 95.9 R_w - 75.5 \tag{2}$$

式中: V_b 为涌浪造成的船只经济损失(万元); R_w 为大于1.1 m的涌浪爬高(m)。根据这个公式可以粗略估计整个县城码头经济损失。以本次景区检查码头最大爬波浪高来计算,则在库水位145 m工况时,整个县城码头经济损失约为970万元;库水位175 m工况时,约为289万元。

同时,根据上述2个案例,也可大致建立停靠船只数量、爬高和经济损失的线性关系如下:

$$V_b = (95.9R - 75.5) N_b / 200 \tag{3}$$

据公式(3)可以利用各码头的涌浪爬高来分别估算不同码头的经济损失,从而得到稍准确的经济损失估算值。以各个码头的平均船只数量和各工况的爬高计算,可得到表3的各码头船只经济损失情况。在库水位145 m工况时,县城码头停泊船只的经济损失总数约为248.5万元;库水位175 m工况时,约为61.6万元。不论哪个水位,景区码头和古

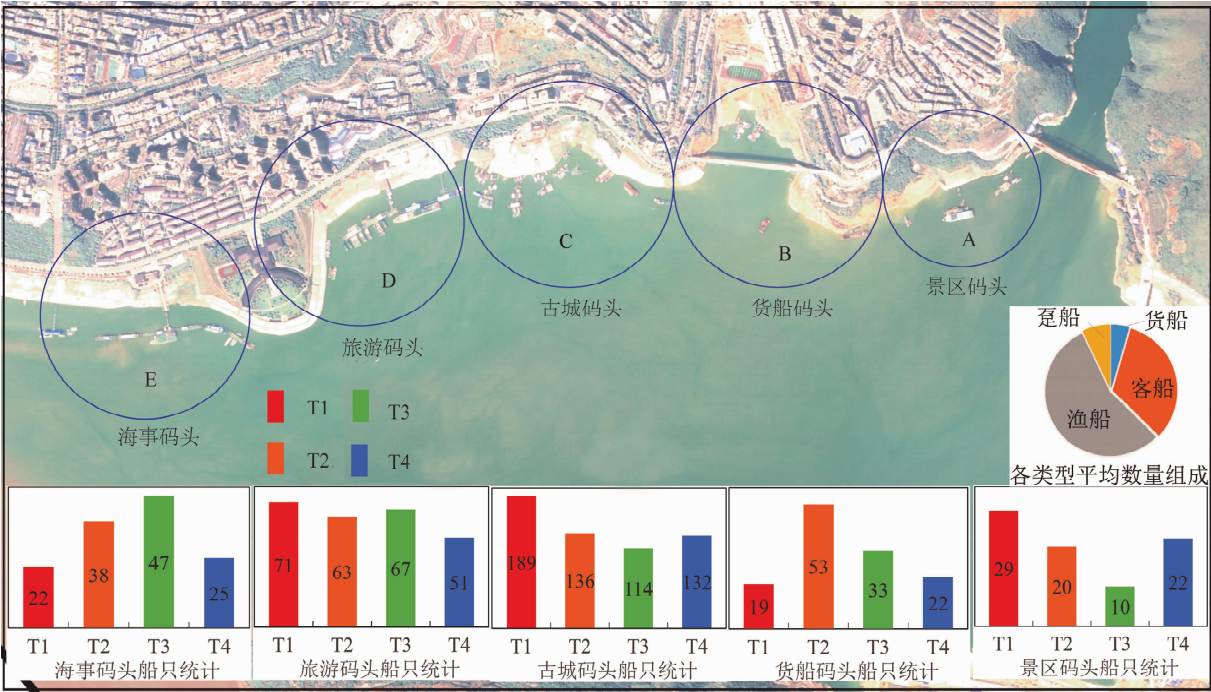


图9 重庆巫山县城各码头停靠船只分布情况图

Fig. 9 Distribution of vessels docked at wharfs in Wushan County, Chongqing

T1—2014年7月31日; T2—2017年4月30日; T3—2018年8月14日; T4—2019年10月16日

T1—31st, July, 2014; T2—30th, April, 2017; T3—14th, August, 2018; T4—16th, October, 2019

城码头的经济损失均是最大的。

除了这些损失外,尚还存在趸船上人员暴露于涌浪中的损失风险。每个趸船上基本常设工作人员为 5 人左右,用于维护码头运行;也会有一些船员和游客在趸船上游玩。这些人员在趸船上,暴露于涌浪中,抵抗涌浪的能力差。当涌浪高度高于人的胸部后(以高度 1 m 来考虑),人就会很难保持平衡。而当涌浪高度高于人的高度时(以高度 1.7 m 来考虑),就易发生溺水现象。因此,以涌浪高度<1 m, 1~1.7 m 和≥1.7 m 来划分趸船工作人员暴露于涌浪的脆弱性,对应于高、很高和极高性。表 4 统计各趸船人员不同水位工况下的脆弱性。景区趸船人员具有极高脆弱性。在 145 m 水位时,货船码头和古城码头的趸船工作人员也具有极高脆弱性。

表 4 巫山县城各码头趸船人员的脆弱性统计表

水位工况 (m)	趸船人员脆弱性				
	景区趸船	货船趸船	古城趸船	旅游趸船	海事趸船
145	极高	极高	极高	很高	高
175	极高	很高	很高	很高	高

表 5 巫山县城各码头涌浪风险情况

水位工况 (m)	风险情况(经济损失风险和人员风险)									
	景区码头/趸船		货船码头/趸船		古城码头/趸船		旅游码头/趸船		海事码头/趸船	
145	1057.3	高	53.36	高	238.51	高	39.36	高中	0.16	中
175	109.82	高	5.28	高中	23.54	高中	6.4	高中	0	中

险。同时,龙门峡内观光船及游客暴露在涌浪的风险概率高,具有高脆弱性;龙门峡为高风险区。根据涌浪分布和河道内的低脆弱性,大宁河龙门峡下游河道内大致分为中风险区和中低风险区,长江干流为低风险区。根据上述描述,可形成风险区划图(图 10)。

从各码头的涌浪过程线来看,从滑坡发生、涌浪来袭到涌浪衰减,持续时间较长。从 300 s 的水位过程线来看,各码头在黄色预警线(1 m 浪高)之上的涌浪持续时间超 200 s(图 11)。对涌浪袭击的持时需要关注,这有利于灾后及时救援。

3 涌浪减灾讨论

滑坡涌浪减灾问题是一个非常具有挑战的风险管控问题。2015 年 6 月巫山县红岩子发生滑坡,同步进行了涌浪预警。但限于认识和技术支撑,仅疏散了船员;造成了 13 艘船只翻沉,包括 1 艘 14 m

滑坡涌浪风险则由滑坡涌浪危险性和承灾体脆弱性共同决定。当前,有两大类风险评价确定方法,一类是决定性方法,例如美国国家海啸减灾计划(NTHMP)所采用的工作定义(Oppenheimer et al., 2009), $R=H_p\times L$,式中 H_p 为海啸出现的可能性, L 为因海啸造成的人和财物损失(Oppenheimer et al., 2009)。由于定量脆弱性计算中已经考虑了涌浪暴露问题,因此滑坡涌浪风险可定量表达为 $R=H\times L$,式中 H 为涌浪危险性, L 为承灾体的经济损失。

还有一类是定性方法,如风险矩阵投影。它把危险发生的强烈程度或可能性和承灾体的伤害程度放入矩阵中,横纵交叉定性综合评估风险等级(HSE, 2001)。这一方法非常适合只能量化描述脆弱性的承灾体。

利用滑坡涌浪危险程度和承灾体脆弱性来进行定量定性的风险区划。表 5 展示了在不同水位下县城各码头涌浪风险情况。码头停靠船只的风险排序分别为景区码头、古城码头、货船码头和旅游码头。景区趸船、货船趸船、古城趸船和旅游趸船的人员都具有高风险和高中风险。海事趸船的人员具有中风

长的海事巡逻艇;损坏大型邮轮超过 5 艘(Huang Bolin et al., 2016)。龙门寨危岩体与红岩子滑坡类似,非常靠近巫山县城。对其涌浪风险,过于严重的解读,而采取过度的防治和关闭景区等措施,可能需要花费巨大或损失重大。过于轻率的忽视,则可能将大量的游客生命和经济损失置于不顾。针对巫山县城滑坡涌浪风险,讨论以下减轻风险的措施,为防治减灾提供技术支撑。

(1)建设地质灾害专业监测网络,开展涌浪预警工作。监测预警本身并不能减少滑坡涌浪危险性,但它可以揭示龙门寨危岩体等地质灾害的变形破坏过程,为防灾减灾提供非常重要的支撑。涌浪预警则可为承灾体和人员紧急撤离提供技术支撑。

(2)基于消除涌浪风险的地质灾害专项治理方案。对引发高风险的地质灾害可以进行相关专项治理,以消除或减轻涌浪风险。例如龙门寨危岩体稳定性主要受基座控制,而基座岩体受水位变动影响,

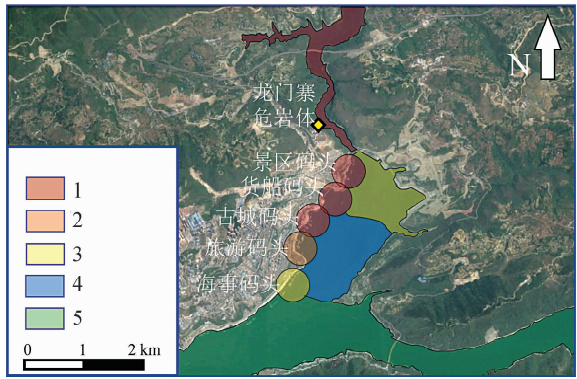


图 10 龙门寨危岩体崩塌涌浪风险分区图

Fig. 10 Risk zoning map for impulse wave generated by Longmenzhai rockfall

1—高风险区;2—高风险区;3—中风险区;
4—中低风险区;5—低风险区
1—Extremely high risk zone; 2—very high risk zone;
3—high risk zone; 4—very high risk zone; 5—low risk zone

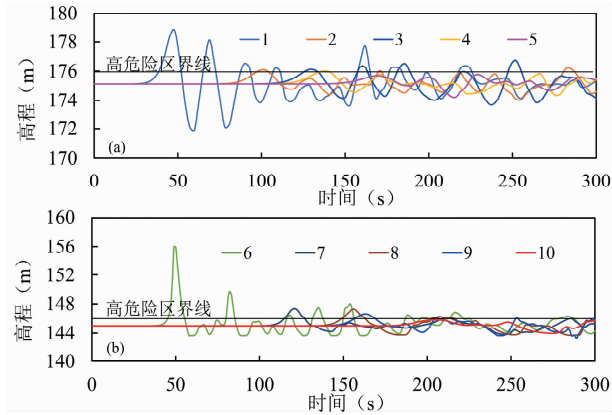


图 11 巫山县城码头典型区域水位过程线

Fig. 11 Water level hydrograph of type locations of the wharfs in Wushan County

1—175 m 工况 A 点;2—175 m 工况 B 点;3—175 m 工况 C 点;4—175 m 工况 D 点;5—175 m 工况 E 点;6—145 m 工况 A 点;7—145 m 工况 B 点;8—145 m 工况 C 点;9—145 m 工况 D 点;10—145 m 工况 E 点
1—Spot A in the working condition of 175 m water level;2—spot B in the working condition of 175 m water level; 3—spot C in the working condition of 175 m water level; 4—spot D in the working condition of 175 m water level; 5—spot E in the working condition of 175 m water level; 6—spot A in the working condition of 145 m water level; 7—spot B in the working condition of 145 m water level; 8—spot C in the working condition of 145 m water level; 9—spot D in the working condition of 145 m water level; 10—spot E in the working condition of 145 m water level

可以考虑进行基座加固与封闭。同时,考虑降低涌浪的强烈程度,则可以仅对危岩体主体进行防治,对其他块体进行监测预警或清理消除即可。

(3)基于降低承灾体风险的涌浪应急避险方案。水库县城附近涌浪主要承灾体是航道内的船只。对航行的船只,可以通过崩塌预警进行航运管制。管制状态下的船只临时停泊处需要确定。同时,部分原有码头趸船也暴露在涌浪中,部分船体在短暂时间内下也可以拖至安全的临时停泊处。因此,临时停泊处很重要,这一位置不能离原来的停泊处太远,同时确保涌浪风险大幅下降。通过分析龙门寨崩塌涌浪特征,当前龙门峡口至旅游码头一线的船只都处于涌浪危害范围内,而大宁河和长江交汇处的巫山海事码头涌浪较小,最大仅 0.8 m 高。建议所有停泊船只可暂时停靠巫山海事码头,总经济损失可从 248.5 万元降低至 1.7 万元左右。该码头距离龙门峡口沿河长度仅 3 km,距离近,陆路交通方便。同时,航道管理部门应该与龙门寨危岩体变形监测预警网络信息共享,进行无时间差的同步预警。多部门合作建立龙门寨崩塌涌浪的应急避险方案,并开展涌浪应急避险演练。

(4)基于消减涌浪的应急工程措施。作为(3)的同步措施,可以实施涌浪消减应急工程。根据 Huang Bolin et al. (2017) 的研究表明,可以对远端传播区涌浪进行消减。在需保护的承灾体外围应急布置水下的垂直板或十字板阵列,用以增加耗散、消减涌浪。值得注意的是,涌浪消减应急工程应先构建相应的方案,开展方案可行性和消减效果研究,并进行相关实操演练。

4 结论

(1)本文首次构建了山区水库城镇滑坡涌浪风险评价技术框架流程,包括潜在涌浪源调查、地质灾害变形破坏研究、滑坡涌浪危险性分析、潜在承灾体脆弱性调查、城集镇涌浪风险评价和风险减灾对策分析等六个分析步骤。

(2)以三峡库区巫山县城为例,分析了县城附近新近变形的滑坡/危岩体。龙门寨危岩体离巫山县城仅不到 1 km,其总方量约为 $30.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。受岩体劣化影响,基座岩体有劈裂等变形迹象;当前处于欠稳定-基本稳定状态,可能发生鼓胀式崩塌破坏。

(3)采用颗粒-流体耦合模型,数值模拟分析了 145 m 和 175 m 水位下龙门寨潜在涌浪的强烈程度。龙门峡旅游船只暴露涌浪中的概率为 $3.4 \times 10^{-4} / \text{a}$,大于一般可接受风险限值;龙门峡航道为高风险区。县城景区码头和古城码头因涌浪而导致的潜在直接经济损失风险高,县城各大码头趸船人员

具有高一极高风险。长江干流为低风险区。

(4)针对巫山县城案例,讨论了消除地质灾害、消减涌浪灾害、降低承灾体风险等三种具体减灾方案。我国正处于加速城镇化阶段,库区县城滑坡涌浪风险评价与减灾研究值得进一步完善和发展,也可为世界范围内山区水库城镇防灾减灾提供借鉴。

References

AGS. 2007. Practice note guidelines for landslide risk management. Australian Geomechanics, 42(1): 64~114.

Barberopoulou A, Legg M R, Uslu B, Synolakis C E. 2011. Reassessing the tsunami risk in major ports and harbors of California I; San Diego. Natural Hazards, 58(1): 479~ 496.

Charalampakis M, Stefatos A, Ferentinos G, Mpourdopoulos K. 2007. Towards the mitigation of the tsunami risk by submarine mass failures in the gulf of Corinth: the Xylocastro resort town case study. [S.l.]: Springer Netherlands, 367~ 375.

Chen Zuyu, Yin Yueping. 2019. Geo-disaster report of the quality inspection group of the Three Gorges Project under the State Council. Chinese Academy of Engineering (in Chinese with English abstract).

Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. 2019. Group standard for risk assessment of landslide surge (Draft for review). Beijing: Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese with English abstract).

Cojean R, Cai Yaojun. 2011. Analysis and modeling of slope stability in the Three-Gorges Dam Reservoir (China)—the case of huangtupo landslide. Journal of Mountain Sciences, 8(2): 166~175.

DB50/143-2003, 2003. Code for investigation of geological disaster prevention and control engineering. Chongqing: Chongqing Administration of Quality and Technology Supervision (in Chinese with English abstract).

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the people's Republic of China. 2015. GB/T 21714. 2-2015/IEC 62305-2: 2010 lightning protection part 2: risk management. Beijing: Chinese Standard Publication (in Chinese with English abstract).

George P, Eyzaguirre V R. 1979. Rock avalanche and wave at Chungar, Peru. Developments in Geotechnical Engineering, 14:269~279.

Giovanna C, Luciano P, Pasquale V. 2018. TXT-tool 4. 039-4. 1: Landslide Investigations and Risk Mitigation: The Sarno, Italy, Case. Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools, 771~784.

He Kai, Yin Yueping, Li Bin, Chen Chunli. 2019. The mechanism of the bottom-crashing rockfall of a massive layered carbonate rock mass at Zengziyan, Chongqing, China. Journal of Earth System Science, 128(4): 104~116.

He Kai, Yin Yueping, Li Bin, Feng Zhen. 2015. Video imaged based analysis of motion characteristic for tower rock collapse. Journal of Engineering Geology, 23(1): 86~ 92 (in Chinese with English abstract).

HSE. 2001. Reducing Risks: Protecting People-HSE's Decision Making Process. London: Her Majesty's Stationery Office.

Hu Houtian. 1985. Preliminary investigation on the classification of landfalls. Journal of the China Railway Society, 7(2):92~102 (in Chinese with English abstract).

Huang Bolin, Liu Guangning, Wang Shichang, Chen Xiaoting, Qi Xin. 2015. Study on the Hazard Mechanism of High and Steep Bank Slopes in the Three Gorges Reservoir Area. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

Huang Bolin, Yin Yueping, Du Chunlan. 2016. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015. Landslides,

13(3):603~616.

Huang Bolin, Wang Shichang. 2017. Wave attenuation mechanism of cross-plates applied in landslide-induced tsunami in river course. Journal of Mountain Science, 14(4): 649~661.

Huang Bolin, Yin Yueping. 2018. Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(3): 621~629 (in Chinese with English abstract).

Huang Bolin, Yin Yueping, Tan Jianmin. 2019a. Risk assessment for landslide-induced impulse waves in the Three Gorges Reservoir, China. Landslides, 16: 585~596.

Huang Bolin, Yin Yueping, Wang Shichang, Tan Jianmin, Chen Xiaoting, Liu Guangning, Zhao Yongbo. 2019b. Analysis of Landslide-induced Impulse Wave. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

Ji Hong. 2013. Numerical simulation and visual risk assessment of landslide surge in Three Gorges Reservoir area. Doctoral dissertation of Chongqing University (in Chinese with English abstract).

Jonkman S N, Van Gelder P H A J M, Vrijling J K. 2003. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. Journal of Hazardous Materials, 99(1): 1~ 30.

Liu Chuanzheng, Liu Yanhui, Lian Jianfa. 2006. Study on genetic mechanism of the badong slope system in the Three Gorges of the Yangtze river. Geological Review, 52(4): 510~ 521 (in Chinese with English abstract).

Oppenheimer D, Rhoades J, Roberts M, Hillebrandt-Andrade C, Whitmore P, Williams C. 2009. National tsunami hazard mitigation program 2009-2013 strategic plan. Silver Spring, 34.

Peng Ling, Xu Suning, Hou Jinwu, Peng Junhuan. 2015. Quantitative risk analysis for landslides: the case of the Three Gorges area, China. Landslides, 12(5):943~960.

Sato H, Murakami H, Kozuki Y, Yamamoto N. 2003. Study on a simplified method of tsunami risk assessment. Natural Hazards, 29(3): 325~ 340.

Tang Minggao, Xu Qiang. 2003. Cognition and prospect on application of nonlinear science in geological hazards. Journal of Catastrophology, 3:72~77 (in Chinese with English abstract).

Terzaghi K. 1950. Mechanism of landslides. The Geological Society of America, Engineering Geology (Berkey), 83~123.

The Third Supervision Department of State Administration of Safety. 2014. Interpretation of the standard of personal acceptable risk and social acceptable risk for production and storage devices of hazardous chemicals (Trial). Labour Protection, 8:44~46 (in Chinese with English abstract).

Turner A K. 2018. Social and environmental impacts of landslides. Innovative Infrastructure Solutions, 3(1): 70~95.

Wang Fang, Yin Kunlong, Gui Lei, Chen Lixia. 2018. Risk analysis on individual reservoir bank landslide and its generated wave. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 43(3):899~909 (in Chinese with English abstract).

Xiao Lili, Wang Jiajia, Zhu Yanbo, Zhang Jun. 2020. Quantitative risk analysis of a Rainfall-induced complex landslide in Wanzhou county, Three Gorges Reservoir, China. International Journal of Disaster Risk Science, 10. 1007/s13753-020-00257-y.

Xing Aiguo, Xu Qiang, Zhu Yaoqiang, Jiang Yao. 2016. The August 27, 2014, rock avalanche and related impulse water waves in Fuquan, Guizhou, China. Landslides, 13: 411~422.

Xu Gang, Zhang Zhibin, Fan Zeyang. 2017. Classification of unstable rock failure modes. Proceedings of 2017 National Engineering Geology Annual Meeting, 25(S): 390~399 (in Chinese with English abstract).

Xu Qiang, Zhang Yifan, Chen Wei. 2010. Vulnerability assessment of geo-hazards in southwest mountainous area——Danba County, Sichuan, China as an example. Geological Bulletin of China, 29(5): 729~738 (in Chinese with English abstract).

Xu Zhonghua, Sun Tongxin, Heng Yanyang. 2009. Reserch on

- planning strategy of sustainable development and environment protection of surrounding towns of large reservoirs in mountain areas——taking Xichuan County, canal head of middle line of South-North water diversion project for instance. Development of Small Cities & Towns, 3: 88~92 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping. 2013. On strengthening the prevention and control of geological disasters in the process of Urbanization. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 24(4): 5~8 (in Chinese with English abstract).
- Zaniboni F, Tinti S. 2019. The 1963 Vajont Landslide: a numerical investigation on the sliding surface heterogeneity. Pure and Applied Geophysics, 176: 279~295.
- Zeynep C C, Mehmet L S, Ahmet C Y, Cagil K, Andrey Z, Betul A. 2016. A new GIS-based tsunami risk evaluation: MeTHuHVA (METU tsunami human vulnerability assessment) at Yenikapı, Istanbul. Earth, Planets and Space, 68(1): 133~154.
- Zhang Maosheng, Xue Qiang, Jia Jun, Gao Bo, Wang Jiayun. 2019. Methods and Practices for the Investigation and Risk Assessment of Geo-hazards in Mountainous Towns. Northwestern Geology, 52(2): 125~135 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhihua, Du Chunlan, Yu Shu, Yang Liu. 2018. Stability analysis and design of control works on Jianchuandong dangerous rockmass in Wuxia Gorge, the Three Gorges Reservoir. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 29(2): 54~60 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhou, Hou Enke. 2011. The life risk acceptability criteria for the geo-hazards in China. Science & Technology Review, 29(36): 17~22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiawen, Xu Fugang, Yang Xingguo, Yang Yuchuan, Lu Pengyuan. 2016. Comprehensive analyses of the initiation and landslide-generated wave processes of the 24 June 2015 Hongyanzi landslide at the Three Gorges Reservoir, China. Landslides, 13(3): 589~601.
- 置个人可接受风险标准和社会可接受风险标准(试行)》. 劳动保护, 8: 44~46.
- 贺凯, 殷跃平, 李滨, 冯振. 2015. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析. 工程地质学报, 23(1): 86~92.
- 胡厚田. 1985. 崩塌分类的初步探讨. 铁道学报, 7(2): 92~102.
- 黄波林, 刘广宁, 王世昌, 陈小婷, 齐信. 2015. 三峡库区高陡岸坡成灾机理研究. 北京: 科学出版社.
- 黄波林, 殷跃平, 王世昌, 谭建民, 陈小婷, 刘广宁, 赵永波. 2019. 滑坡涌浪分析. 北京: 科学出版社.
- 黄波林, 殷跃平. 2018. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究. 岩石力学与工程学报, 37(3): 621~629.
- 纪虹. 2013. 三峡库区滑坡涌浪数值模拟及其可视化风险评估. 重庆大学博士学位论文.
- 刘传正, 刘艳辉, 连建发. 2006. 长江三峡巴东复杂斜坡系统成因研究. 地质论评, 52(4): 510~521.
- 汤明高, 许强. 2003. 对非线性科学在地质灾害领域的认识和展望. 灾害学, 3: 72~77.
- 王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 陈丽霞. 2018. 单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害风险分析. 地球科学, 43(3): 899~909.
- 徐刚, 张志斌, 范泽英. 2017. 危岩失稳模式分类研究. 2017 年全国工程地质学术年会论文集. 25(S): 390~399.
- 徐中华, 孙同听, 横艳阳. 2009. 山区大型水库周边城镇环境保护与可持续发展规划策略探讨——以南水北调中线渠首淅川县为例. 小城镇建设, 3: 88~92.
- 许强, 张一凡, 陈伟. 2010. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法——以四川省丹巴县城为例. 地质通报, 29(5): 729~738.
- 殷跃平. 2013. 加强城镇化进程中地质灾害防治工作的思考. 中国地质灾害与防治学报, 24(4): 5~8.
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 徐继维, 高波, 王佳运. 2019. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践. 西北地质, 52(2): 125~135.
- 张枝华, 杜春兰, 余姝, 杨柳. 2018. 三峡库区巫峡箭穿洞危岩体稳定性分析及防治工程设计. 中国地质灾害与防治学报, 29(2): 54~60.
- 赵洲, 侯恩科. 2011. 中国地质灾害生命可接受风险标准研究. 科技导报, 29(36): 17~22.
- 中国岩石力学与工程学会. 2019. 滑坡涌浪危险性评估团体标准(送审稿). 北京: 中国岩石力学与工程学会.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2015. GB/T 21714. 2-2015/IEC 62305-2:2010 雷电防护第 2 部分: 风险管理. 北京: 中国标准出版物.

参 考 文 献

- 重庆市质量技术监督局, 2003. DB50/143-2003 地质灾害防治工程勘察规范. 重庆: 重庆市质量技术监督局.
- 陈祖煜, 殷跃平. 2019. 国务院三峡枢纽工程质量检查小组报告地质灾害专题报告. 中国工程院.
- 国家安全监管总局监管三司. 2014. 解读《危险化学品生产、储存装

**Study of risk assessment and mitigation for landslide-induced impulse wave
near towns in reservoir areas**

HUANG Bolin^{* 1)}, YIN Yueping²⁾, LI Bin³⁾, FENG Wanli¹⁾, QIN Zhen¹⁾, ZHANG Peng¹⁾

1) *Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;*

2) *Geological Environment Monitoring Institute of China, Beijing 100081, China;*

3) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

** Corresponding author: bolinhuang@aliyun.com*

Abstract

The strong disturbance caused by human engineering and the impoundment of reservoir leads to risk of landslide and impulse wave generation in most of the reservoir towns in the high susceptibility geo-disaster areas. There is historical documentation of tragedies caused by these disasters. In this paper, six steps for risk assessment of landslide-induced impulse wave near cities and towns in mountainous reservoirs, including investigations on potential tsunami sources, deformation and research failures, impulse wave hazard analysis, vulnerability investigation, risk assessment and risk mitigation countermeasures analysis, are constructed. Taking Wushan County in the Three Gorges Reservoir area as an example, the Longmenzhai rockfall nearest to the county was selected for technical demonstration. The volume of this columnar dangerous rock mass is about $30.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, which is in the state of under-stable and basic stability. The analysis of particle fluid coupled numerical model shows that a maximum impulse wave of about 17.9 m and 11.6 m will be generated by collapse of this dangerous rock body under water level of 145 m and 175 m, respectively. The dense wharf ships and frequent tourist ships are mainly risk receptors in the Wushan County. The probability of exposure of tourist ships to waves is $3.4 \times 10^{-4}/\text{a}$, which exceeds the acceptable risk limit. The potential direct economic loss of Tourist Wharf and Gucheng Wharf caused by the impulse waves is large (more than 2 million RMB), and the pontoon personnel of each major wharf in the county has a high-extremely high risk. In view of the current case, four specific mitigation schemes are discussed. Relevant research can provide technical support and reference for geo-disaster prevention and mitigation of reservoir towns in mountainous are as around the world.

Key words: mountainous town; landslide-induced impulse wave; risk assessment; Longmenzhai rockfall; Three Gorges Reservoir area