

# 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究

黄波林<sup>1,2</sup>, 殷跃平<sup>3</sup>

(1. 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002;  
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:** 2003 年蓄水以来, 三峡水库发生了多起滑坡涌浪灾难性事件。滑坡涌浪灾害的增多推动着水库滑坡涌浪风险评估的发展。系统阐述专项水库滑坡涌浪风险评估的目的、内容和对象, 定义滑坡涌浪风险评估相关概念, 并构建风险评估范围界定、涌浪危险性分析、易损性分析、涌浪风险估计和涌浪风险划分 5 个分析步骤的水库滑坡涌浪风险评估技术框架。以三峡库区巫峡板壁岩崩塌隐患点为例, 展示典型水库滑坡涌浪风险评估流程及每个步骤的产品。板壁岩涌浪主要承灾体为河道船只, 停泊船只的可能最大直接经济损失约为 13 万元, 航行船只的可能损失数量为 2 艘。长江河道有约 3 km 为板壁岩涌浪的高风险区域。量化的滑坡涌浪风险评估体系有利于圈定涌浪灾害的风险点或区域, 也有利于多个滑坡涌浪的风险排序。

**关键词:** 边坡工程; 水库滑坡涌浪; 风险评估; 船只承灾体脆弱性; 板壁岩

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)03 - 0621 - 09

## Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir

HUANG Bolin<sup>1,2</sup>, YIN Yueping<sup>3</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;  
2. National Field Scientific Observation Station of Landslide in the Yangtze Three Gorges, Hubei Province, Yichang, Hubei 443002, China; 3. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Many disastrous events of impulse waves generated by landslides have occurred in the Three Gorges Reservoir since its impoundment in 2003. This paper describes systematically the purpose, content and object of risk assessment for landslide induced impulse wave in reservoir for the first time and gives the definitions to the relevant concepts and establishes the technical frame with five phases, including the scope definition, hazard analysis, vulnerability analysis, risk estimation and risk division. The risk assessment process of impulse wave in reservoir and the products in every phase are demonstrated through the potential rockfall at Banbiyan in Wu Gorge of the Three Gorges Reservoir. The main risk receptors of landslide generated impulse wave at Banbiyan are ships in the waterway, with the potential maximum direct economic loss of thirteen thousand Yuan to anchored boats and possible two sailing ships capsized. There is a high risk area about three kilometers long suffering from the landslide generated impulse wave at Banbiyan in the Yangtze River. A quantitative risk assessment system for landslide induced impulse wave is beneficial to delineating the risk point or region suffering from the impulse wave disaster, and ranking the risk order of many potential landslide-induced

**收稿日期:** 2017 - 08 - 23; **修回日期:** 2017 - 12 - 02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41372321); 中国地质调查局项目(121201009000161315)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41372321) and Project from China Geological Survey(Grant No. 121201009000161315)

**作者简介:** 黄波林(1979 -), 男, 2001 年毕业于吉林大学建设工程学院, 现任三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室主任、研究员, 主要从事水库滑坡及滑坡涌浪方面的教学与研究工作。E-mail: bolinhuang@aliyun.com。通讯作者: 殷跃平(1960 -), 男, 现任总工程师。E-mail: yyueping@mail.cgs.gov.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1047

impulse waves.

**Key words:** slope engineering; impulse wave generated by landslide in reservoir; risk assessment; vulnerability of risk receptor of ship; Banbiyan potential rockfall

## 1 引言

水库蓄水后,大坝上游江段通航条件明显改善,大量物流选择水上交通。长江三峡通航管理局的统计数据显示,2011年三峡船闸货运量首次达到1亿t,提前19a达到设计能力。2016年,船闸货运量已增长过1.3亿t<sup>[1]</sup>。长江三峡成为了真正的黄金水道。然而,伴随着库区社会经济发展的同时,三峡水库滑坡涌浪灾害事件增多;例如2015年巫山红岩子滑坡涌浪造成13艘船只翻沉,2人死亡<sup>[2]</sup>。长江航道因滑坡涌浪灾害或潜在滑坡涌浪而封航、限航也变得多起来。水库区很多滑坡体上没有直接威胁对象,产生的涌浪却对远端航道和沿江居民产生了极大危害。滑坡涌浪大范围的致灾风险情况正在成为水库滑坡防治的重要依据。这些是水库区开展专项滑坡涌浪风险研究的驱动力。

目前,国内外研究滑坡涌浪的方法有公式法、物理试验法和数值分析方法<sup>[3-4]</sup>。公式法来源广泛,其适用范围与其来源密切相关<sup>[5]</sup>。公式法计算便捷,计算结果较单一,但很难对大范围滑坡涌浪灾害进行把握。物理试验法尽管能再现或预演滑坡涌浪过程<sup>[6-7]</sup>,但其所需要的数据、经费、场地和时间花费大。数值分析方法是滑坡涌浪领域重要的研究工具。由于计算资源的原因,基于Navier-Stokes方程的滑坡涌浪模型大多用于研究滑坡/水体动力互馈过程和局部涌浪危害问题<sup>[8-12]</sup>。基于水波动力学方程的滑坡涌浪模型则有效地平衡了计算资源与计算精度,能高效的解决长距离、大面积涌浪计算问题<sup>[13-14]</sup>。

涌浪产生后,承灾体易损性评价是风险评价的重要内容。例如李红英等<sup>[15]</sup>以库区内某单体滑坡为例,计算了滑坡稳定性系数、潜在涌浪大小和堰塞坝高度,对枢纽工程这一潜在承灾体进行了综合风险分析。在区域上,纪虹和司鹤<sup>[16]</sup>从致灾因子、孕灾环境和承灾体3个方面构建了基于GIS技术的滑坡涌浪易损性评价指标体系。尽管近年来滑坡涌浪研究进展迅猛,专项滑坡涌浪风险评估系统研究尚不成熟。

风险评估和风险管理概念的提出由来已久,滑坡风险评价与管理已经有了很多的研究成果<sup>[17-19]</sup>。目前在香港、美国、意大利等地已经有不少基于风

险的边坡控制或环境管理方面较为成熟的应用实例<sup>[20-22]</sup>。近年来,我国一些学者基于中国滑坡管控现状,完善建立了滑坡风险评估的基础理论、基本理念、原则、技术方法与流程<sup>[17-18]</sup>;并在多地开展了实践<sup>[19]</sup>。同时,与内陆滑坡涌浪较类似的海洋海啸在风险评估方面也取得了较大进展<sup>[23]</sup>。回顾了海啸风险评估方法历程,推荐了使用5个标准步骤来开展海啸风险评估工作;并以西班牙Cadiz城为例开展了海啸风险评估<sup>[24]</sup>。采用NAMIDANCE数值分析软件分析了2个断裂活动造成地震海啸的场景,基于GIS平台利用多因素的AHP法形成了Istanbul的Yenikap区风险分布图。

本文借鉴滑坡风险评估和海啸风险评估,定义水库区滑坡涌浪风险,探索建立以航道船只为主要承灾体的水库区滑坡涌浪风险评估框架,并以三峡库区典型案例开展滑坡涌浪风险评估示范。水库区滑坡涌浪风险评估将为库区地质灾害防控提供必要的技术依据。

## 2 滑坡涌浪风险定义

不同的人、不同的领域对风险都有各自的定义和理解。世界气象组织(The World Meteorological Organization)采用了基于Crichton风险三角形的风险定义<sup>[25]</sup>:“Risk is the probability of a loss, and this depends on three elements: hazard, vulnerability, and exposure. If any of these three elements in risk increases or decreases, then the risk increases or decreases respectively”,这一定义被广泛认同。它认为滑坡风险评价重点分析评价地质灾害的综合危险性和后果;滑坡风险评估是在地质灾害空间预测评价的基础上综合考虑人员、社会经济要素和抗灾能力的综合预测评价,不仅需要评价时间概率,还需要进行空间预测。美国国家海啸减灾计划定义海啸风险为:“the product of the probability of the occurrence of a tsunami(i.e., the “hazard”) times the loss of property and life due to the tsunami”<sup>[26]</sup>,认为海啸风险是海啸出现的概率与海啸造成的人员及经济损失之积。

在中国,内河或水库区管理者或政府部门对滑坡涌浪风险承担责任。因此,他们对滑坡涌浪风险

产品有着更迫切和明确的需求。对这些管理者而言，开展专项滑坡涌浪风险评估的主要目的是进行风险管控，降低或消灭涌浪对承灾体的危害，规避可能的风险。这使得水库滑坡涌浪风险评估的主要内容是针对某个滑坡，评估该滑坡可能产生的涌浪风险问题。这一点与美国、日本、新西兰等国家以沿海城镇集镇为对象，评估它可能遭受的海啸风险完全不一样<sup>[27-29]</sup>。

根据我国水库滑坡涌浪风险评估的目的与内容，本文定义以下有关概念：

(1) 风险情况由可能的伤亡人员(死亡、受伤)以及可能的经济损失(直接的或间接的)来表述。与大多数风险研究一样，滑坡涌浪风险的计算仅考虑人员损失或者直接经济损失。

(2) 水库区滑坡涌浪风险评估定义为水库区潜在滑坡涌浪造成人员、财产的可能损失。研究对象是某个滑坡涌浪的风险情况。本文中所指“滑坡”是广义上的岩土体运动，它包括专业术语中的岩质滑坡、土质滑坡和崩塌等类型。涌浪风险的承灾体主要为暴露在涌浪灾害下的船只、沿江基础设施、构筑物和人。承灾体的易损性则考虑不同承灾体暴露在涌浪中的抗灾能力和逃离能力。滑坡风险评估一般来讲应包括滑坡涌浪风险评估这一内容。若滑坡造成灾害的形式以涌浪为主，则滑坡风险评估的主要内容就是滑坡涌浪风险评估。滑坡涌浪风险评估专门评估涌浪造成的风险情况。

(3) 滑坡涌浪风险管控定义为为了减少滑坡涌浪灾害风险而采取的措施，包括人员疏散、预警预报工程、快速疏散通道工程、滑坡治理工程、滑坡分项治理、涌浪消减工程、航道关闭、航道限制等等。

(4) 由于评估水库滑坡涌浪风险时，已经假设滑坡发生破坏。因此，滑坡发生的可能性或概率性不在水库滑坡涌浪风险评估的考虑之列。

### 3 滑坡涌浪风险评估框架

滑坡风险评估和海啸风险评估可以采用确定性方法和统计学方法或者两者相结合的方式进行。但是，就像澳大利亚地质力学学会<sup>[30]</sup>认为的一样，无论何时，只要有可能，风险评估就应该以定量分析为基础，尽管结果可能用定性的术语来总结。由于产品需求、目的与技术限制，水库滑坡涌浪风险评估应以定量或定量-定性结合的方式(半定量)进行，量化的风险值为今后风险等级划分和管控提供基础。

可采用定量分析的方法计算涌浪强度和范围，

获得特定输入参数下涌浪的相关输出结果。采用定量或半定量的方式分析承灾体及其易损性。调查并(半)量化人口分布及其密度情况和交通道路情况，统计船只通行数量、速度及空间概率分布，估计构筑物价值及抗冲击能力。滑坡涌浪灾害以及承灾体之间的关系可以通过风险矩阵投影展示或聚类分析，也可以在地理信息系统中形成风险主题地图来呈现。

根据上述分析，借鉴滑坡风险评估方法和海啸风险评估方法，推荐使用以下步骤来实现水库区滑坡涌浪风险评估：

(1) 风险评估范围界定(scope definition)：滑坡涌浪风险评估产品用户需求及问题的确定，可能引发涌浪的滑坡确定，评估区地形地貌范围的确定，评估方法的确定。

(2) 涌浪危险性分析(hazard analysis)：计算分析河道内潜在涌浪的最大浪高分布、最大爬高分布、涌浪抵达时间分布等涌浪灾害强度。

(3) 脆弱性分析(vulnerability analysis)：确定潜在涌浪的承灾体(risk receptor)，承灾体的分布情况及暴露情况，承灾体脆弱性(抵抗涌浪的能力和逃离能力)。

(4) 涌浪风险估计(risk estimation)：叠加第 2 步和第 3 步的信息，定量或半定量评估承灾体的风险情况或风险值。风险值一般为无量纲值，利用值大小定量表征风险大小。

(5) 涌浪风险划分(risk division)：最后，将风险评估情况进行对比分级或排序。如果存在高风险，提出对应措施来降低风险。

图 1 展示了主要的分析步骤及预期成果。由于中国社会仍然没有形成有效的风险可接受标准，风

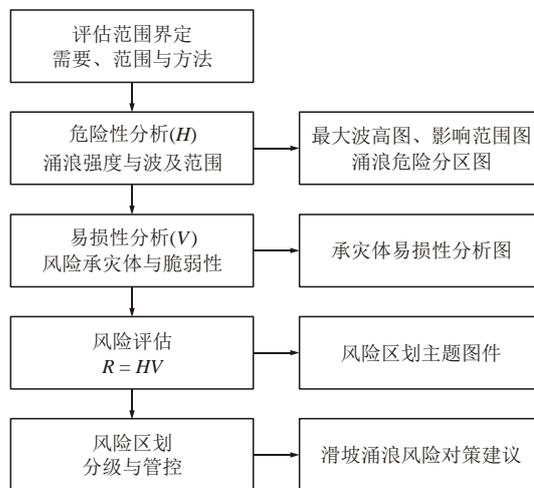


图 1 水库滑坡涌浪风险评估过程和产物

Fig.1 Process and products of risk assessment for landslide generated impulse wave in reservoir

险划分以风险排序和风险管控建议为主。为了进一步说明所提出的水库滑坡涌浪风险评估框架及方法，利用一个三峡库区的典型案例来进行应用示范。

### 4 案例研究

三峡库区巫峡崩塌隐患点众多<sup>[31]</sup>，巫峡也是近年来涌浪灾害发生较多的区段。板壁岩崩塌隐患点是新近发现的大型崩塌隐患点之一，当地政府非常关注。以板壁岩崩塌隐患点为例，示范说明滑坡涌浪风险评估方法及过程。

#### 4.1 板壁岩崩塌隐患点概况

板壁岩危岩体地处长江巫峡左岸，距上游巫山县城直线距离约 20 km，距下游巴东县城直线距离约 25 km，距下游培石码头居民区约 2.5 km(见图 2)。板壁岩斜坡由三叠系嘉陵江组三段(T<sub>1j</sub><sup>3</sup>)薄层~厚层状灰岩、泥灰岩构成，基岩产状为 110°~120°∠3°~5°。该段岸坡坡向为 350°，地形陡峻，局部地段近于直立形成陡崖面。板壁岩危岩体发育于陡崖前缘凸出部分。

该危岩体东侧边界为一条长大张开的裂隙，裂隙产状 354°∠87°，延伸长度约 50 m，张开 30~70 cm，可见深度超过 5 m，局部为碎块石充填。西侧边界为下游崖壁面及其延伸的裂隙，产状为裂隙产状 124°∠85°。危岩体后缘以 4 条不连续的卸荷裂隙为界。据后缘探槽调查揭露，卸荷裂隙走向与坡面走向一致。这 4 条裂隙走向 70°~85°，延伸长度 27~54 cm，张开 10~55 cm，局部粉质黏土填充。危岩体底边界为 2 条近平行的层间剪切带(见图 3)，剪切带形成的弯折面产状为 350°∠50°。岩层弯折方向显示剪切带非现今重力场造成，应是构造成因。第一条剪切带剪出口高程约 162 m，剪切带宽 0.3~0.8 m。另外一条剪切带发育规模较大，剪出口高程

约 145 m，剪切带宽 0.5~1.7 m。除崖壁面上有几条延伸不远的垂直闭合裂缝外，危岩体上暂未发现其他结构面；危岩体内部结构较完整。

在这些边界条件控制下，危岩体沿江长度约 300 m，厚度平均约 13 m，高度约 70 m，总方量约 270 000 m<sup>3</sup>。由于剪切带基本处于 145~175 m 水位变动带上，长期浸泡-曝晒风干循环作用下剪切带强度将出现大幅下降<sup>[32-34]</sup>。在 145 m 水位附近目前已经可见该条剪切带被淘蚀，局部掏空；底部弯折面清晰可见。在上覆危岩体重力作用下，剪切带弯折面将进一步连通。最终，危岩体以剪切带弯折面为底滑面，以滑移方式失稳。

#### 4.2 评估范围界定及潜在涌浪危险分析

板壁岩斜坡上没有居民点或重要基础设施，没有直接危害对象。因此，板壁岩滑坡涌浪风险评估的主要问题是滑坡涌浪对航道的危害问题。本次评估采用定量计算的方式开展，大于 0.5 m 的涌浪影响范围要被区划出来。类比以往滑坡涌浪案例，评估范围应超过 10 km。因此，确定河道计算区域大致从青石至马鬃山(长约 15 km)，支流主要有抱龙河、培石河和鳊鱼溪，临江居民点有培石和青石，码头有培石码头和鹭鸶码头。

岩土体的运动过程是一个能量传递、转化和耗散的过程；在与水体左右过程中，岩土体的动能传递给水体，从而形成涌浪波。准确计算板壁岩的潜在涌浪灾害情况，首要关键是估算板壁岩的运动速度计算。开展崩滑体的运动计算有多种方法，目前国内应用较多的方法有经验公式法、理论公式法、数值分析方法。经验公式法以等效摩擦因数经验公式为代表<sup>[35]</sup>；理论公式法多基于牛顿定律和岩土力学<sup>[36-38]</sup>；数值分析方法主要假定崩滑体为牛顿体或非牛顿体或颗粒体开展运动分析<sup>[39-40]</sup>。理论公式法从研究崩滑体运动体系能量转换出发，具有物理概



图 2 板壁岩危岩体位置图及照片  
Fig.2 Location and scene of potential rockfall at Banbiyan

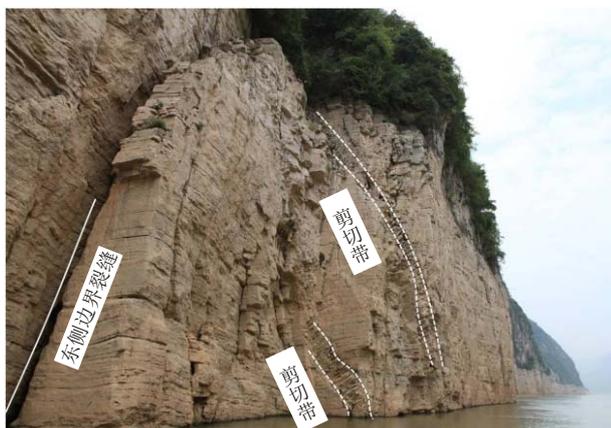


图 3 危岩体中剪切带近照

Fig.3 Picture of shear zone in potential rockfall

念明确、可操作性强的优点，应用较多。水库崩滑体运动中水阻力是重要因素，汪 洋等<sup>[41]</sup>通过物理试验发现，运动时产生的压强水头增量与速度平方成正比。考虑浮力、水阻力和摩擦力，根据牛顿运动定律，可得崩滑体质点的加速度计算公式为

$$(G - F_f) \sin \alpha - f(G - F_f) \cos \alpha - 0.5u^2 \rho_w s = ma \quad (1)$$

式中： $G$  为重力， $F_f$  为浮力， $\alpha$  为斜坡角度， $f$  为摩擦因数， $u$  为即时运动速度， $\rho_w$  为水的密度， $s$  为迎水面面积。

根据板壁岩主剖面(见图 4)，代入相关参数，迭代计算可以得到 145 和 175 m 水位工况下的板壁岩运动速度(见图 5)。145 m 水位时，最大运动速度为 21.1 m/s；175 m 水位时，最大运动速度为 13.6 m/s。175 m 水位时危岩体下部浸泡在水中，运动初始就要抵抗水阻力，运动速度要小于 145 m 工况时。采用经过龚家坊等滑坡涌浪案例验证过的 FAST/FUNWAVE 程序开展板壁岩潜在涌浪计算<sup>[13]</sup>。参照上述板壁岩滑坡几何参数、水文参数和运动参数，

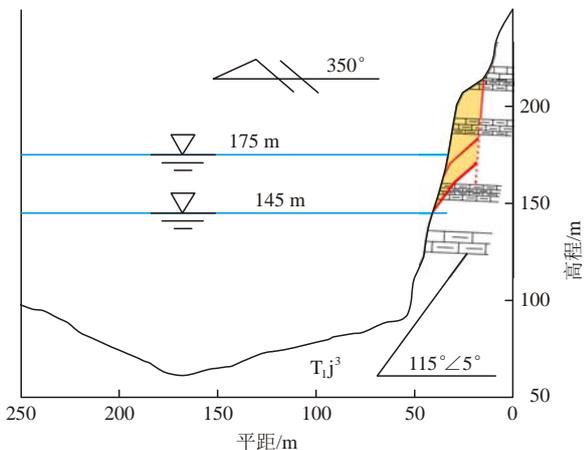


图 4 板壁岩剖面图

Fig.4 Section of Banbiyan slope

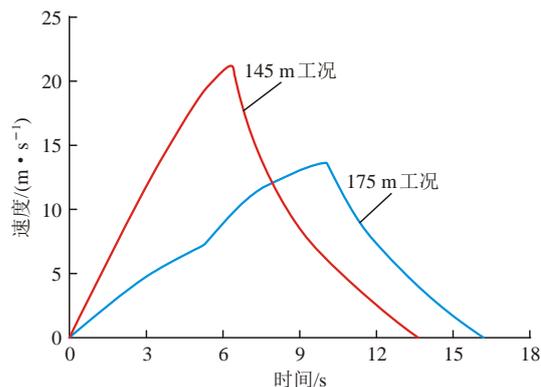


图 5 不同水位条件下运动速度过程图

Fig.5 Process of dynamic velocity under different water levels

输入板壁岩危岩体初始涌浪的计算参数。FAST/FUNWAVE 的相关原理、计算步骤和计算结果有效性验证内容等可参见 B. Huang 等<sup>[2, 14, 42]</sup>，本文仅利用该方法进行涌浪大小及波及范围计算。

175 m 水位时，板壁岩产生的河道涌浪最大波幅可达 32 m，最大爬高为 11.5 m；在白鹭鸶沟内的最大爬高为 5.1 m，在培石村的最大爬高为 2.5 m。根据涌浪预警分区，河道内最大波幅超过 3 m 的河道(红色预警区)长约 2.0 km，最大波幅在 2~3 m 范围的河道(橙色预警区)长约 2.1 km；最大波幅大于 1 m 的河道(黄色预警区)长约 4 km(见图 6)。

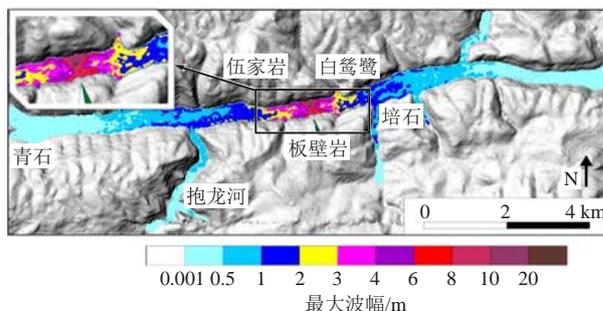


图 6 175 m 水位最大波幅分布

Fig.6 Distribution of maximum amplitude of water wave at water level of 175 m

145 m 水位时，板壁岩产生的河道涌浪最大波幅可达 48 m，最大爬高为 20.0 m；在白鹭鸶沟内的最大爬高为 6.8 m，在培石村的最大爬高为 3.8 m。河道内最大波幅超过 3 m 的河道(红色预警区)长约 3.0 km，最大波幅在 2~3 m 范围的河道(橙色预警区)长约 1.5 km；最大波幅大于 1 m 的河道(黄色预警区)长约 2.2 km。

### 4.3 承灾体易损性分析

承灾体易损性是针对突发条件下，而不是有涌浪预警条件下的承灾体易损性。针对滑坡涌浪事件

开展承灾单元的认定和易损性分析,包括人员分布、可能损失或受伤估计,建筑物分布及可能损毁情况估计,船只分布及可能受损或翻沉估计,恢复重建的难易程度与财产损失估计<sup>[43-44]</sup>。

在水库滑坡涌浪易损性研究中,有一些承灾体是固定的,例如码头趸船、停靠的船只和沿江建筑物。固定的承灾体是否受灾一般需要考虑2个方面,一个是承灾体在涌浪灾害中的暴露度,二是承灾体是否有能力抵抗这一暴露度带来的伤害<sup>[45-46]</sup>。暴露度可以根据涌浪灾害与承灾体的空间分布来确定。抗灾能力的考量则较为复杂,本次研究暂不考虑抗灾能力问题。

如果涌浪高度高于临江居民建筑高程,将对临江居民造成威胁,这一危害度可以暴露百分比和当地人口数或建筑物价值来折算统计,通过下式来计算:

$$V_p = \sum NR / H_c \quad (2)$$

式中:  $V_p$  为居民区易损性,  $N$  为居民区人口数或建筑物数量,  $R$  为房屋暴露在涌浪下的高度,  $H_c$  为房屋高度。

175 m 水位条件下,滑坡涌浪抵达培石村的最大爬高为 2.5 m,有 3 栋房屋的支撑框架或支撑墙暴露在涌浪下,  $V_p$  为 0.8 栋房屋。145 m 水位条件下,临江居民区没有暴露在涌浪下。

长期来看,停靠码头的船只数量与分布基本是固定的。巫山码头的船只停靠数约 200 艘左右,停靠青石码头的船只数量约为 60 艘;停靠培石码头的船只数量约为 9 艘;停靠鹭鸶码头的船只约为 4 艘。码头停靠船只易损性与涌浪爬高直接相关。在红岩子滑坡涌浪事件中,巫山渔山码头最大爬坡高 6 m,造成了 13 艘船只翻沉,船只直接损失价值约 500 万元。在龚家方滑坡涌浪事件中,巫山渔山码头最大爬坡高 1.1 m,没有船只翻沉,仅少量受损,船只直

接经济损失约 30 万元。基于上述案例,大致建立经济损失价值与停靠船只数量、爬高的线性关系如下:

$$V_b = (95.9R - 75.5)N_b / 200 \quad (3)$$

式中:  $V_b$  为船只损伤价值(万元),  $R$  为大于 1.1 m 的爬高,  $N_b$  为停靠码头的船只数量。

175 m 水位条件下,抵达青石的涌浪最大爬高低于 1.1 m,对青石码头没有冲击。抵达培石码头的涌浪最大爬高为 2.5 m,培石码头经济损失价值约为 7.4 万元。抵达鹭鸶码头的涌浪最大爬高为 5.1 m,鹭鸶码头经济损失约为 8.3 万元。

145 m 水位条件下,抵达青石的涌浪最大爬高低于 1.1 m,对青石码头没有冲击。抵达培石码头的涌浪最大爬高为 3.8 m,培石码头经济损失价值约为 13 万元。抵达鹭鸶码头的涌浪最大爬高为 6.8 m,鹭鸶码头经济损失约为 11.5 万元。

与固定承灾体不同,水库区内有一些承灾体是流动的,例如航道中行驶的船等。航道中行驶的船只易损性与涌浪的高度分布有密切关系。评估区暴露在红色预警区、橙色预警区和黄色预警区内的船只会有不同程度的损伤概率。评估范围内河道长约 15 km,货船和邮轮的平均航速约 15 km/h,因此船行该河道需要 1 h。通过多天统计发现(见图 7),1 d 平均约 235 艘船通行巫峡,1 h 有 9~10 艘船通过。假定船只等间距航行,结合涌浪预警区河道长度,则可计算出处于各预警区的船只数量。红色预警区的船只损伤概率以 80% 计算,橙色区的按 40% 计算,黄色区的按 20% 计算。则行进中船只的易损性计算公式为

$$V_m = (N / 15)la \quad (4)$$

式中:  $V_m$  为评估区内船只的易损性;  $N$  为 1 h 内评估区船只数量;  $l$  为红色预警区、橙色预警区和黄色预警区的河道长度;  $a$  为各预警区船只损失概率。

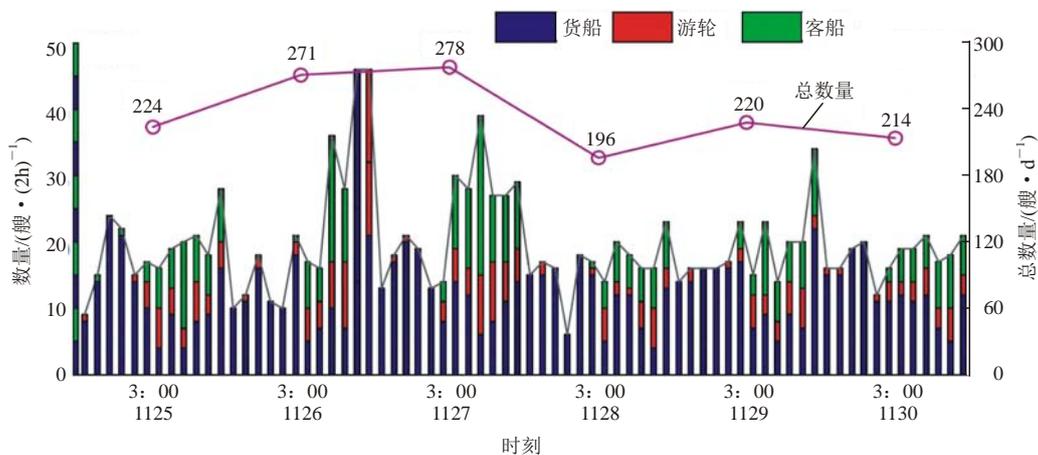


图 7 巫峡航道船只统计

Fig.7 Statistical results of ships navigating in Wu Gorge

根据不同水位不同预警区的长度来简单计算航道船只易损性。175 m 水位条件下,  $V_m = 2.16$ , 即约 2 艘船可能因涌浪而受到损伤。145 m 水位条件下,  $V_m = 2.29$ , 即约 2 艘船可能因涌浪而受到损伤。

#### 4.4 滑坡涌浪风险评估与区划

耦合涌浪危险信息和承灾体易损性信息, 可以计算滑坡产生涌浪的风险情况。涌浪风险计算公式<sup>[47-48]</sup>一般表述为:  $R = HV$  ( $R$  为风险值;  $H$  为波高值, 代表灾害性;  $V$  为承灾体易损性值)。根据本次研究的实际情况, 板壁岩涌浪风险计算公式可进一步表述为  $R = H(V_p, V_b, V_m)$ 。

板壁岩滑坡涌浪造成的风险情况可按照居民房屋、停泊和行进船只易损性分别计算。当 175 m 水位下时, 潜在涌浪风险情况如下: 居民房屋风险值为 2, 码头停泊船只风险为 60.8, 航道行进船只风险为 23.5。145 m 水位下时, 潜在涌浪风险情况如下: 居民房屋风险值为 0, 码头停泊船只风险为 127.6, 航道行进船只风险为 42.2。对比板壁岩在不同水位下的滑坡涌浪风险情况可知, 对临江居民区, 高水位下培石区域存在一定风险; 对船只, 高水位下的风险值小于低水位下的风险值。

根据不同水位下滑坡风险值和对应的风险区域, 可以综合区划板壁岩的滑坡涌浪风险区域。滑坡入江上下游 1.5 km (共约 3 km) 河段为高风险区 (见图 8 黑色区域), 该区域包括鹭鹭码头。滑坡入江上下游共约 2 km 河段为中风险区, 培石社区及码头处于中风险区, 中风险区位于高风险区外围 (见图 8 灰色区域)。低风险区位于中风险区外围, 共约 2 km 长 (见图 8 白色区域)。板壁岩出现破坏迹象后, 高-低风险河段长约 7 km, 范围从抱龙河口至鳊鱼溪河口。



图 8 滑坡涌浪风险区划简图

Fig.8 Zones divided according to the potential impulse wave generated risk at Banbiyan

## 5 讨论

显然, 作为正在发展的滑坡涌浪风险评估技术

从流程到方法都有很多值得探讨的地方:

(1) 从本质上讲, 滑坡涌浪风险是岩土体失稳造成的; 但是这一次并未考虑滑坡或危岩体的失稳概率。是否有必要在专项滑坡涌浪风险评估中增加滑坡失稳概率一个值得思考的问题。正面来看, 滑坡涌浪分析肯定是在滑坡有失稳迹象时进行的分析, 失稳概率分析显得有点多余; 而且至少又增加了一个假设, 风险评估的不确定性增加。但是, 不可否认, 有变形破坏现象的滑坡其失稳概率还是有较大差异的, 那么它们产生的涌浪风险也应表现出概率性的差异。这一方面可以进行广泛探讨, 以形成共识。

(2) 尽管本次滑坡涌浪计算及风险评估定量进行了计算表述; 但滑坡涌浪的高低风险定量标准并未考虑, 仅定性进行了分析。目前, 由于地质灾害特殊的社会敏感性, 对财产损失、船只的损毁和人员伤亡的容许程度并未形成。因此, 社会可接受的风险标准尚没有达成一致, 因此量化的风险标准很难给出。

(3) 滑坡涌浪风险由于涉及到动态的承灾体, 其风险表现其实也是动态的。较为明显的, 晚上货船流量明显多一些; 周末白天邮轮又非常多。怎么动态表述或概率性表述这些承灾体, 以及承灾体的抗灾能力是今后相关研究工作的重要方向之一。

(4) 单个滑坡涌浪的风险评估值可以了解评估区的风险点和范围, 多个滑坡涌浪的风险评估值则可以对多个滑坡的风险情况进行排序, 以利于安排滑坡防治的优先顺序和风险管理。

## 6 结论与建议

(1) 本文首次阐述了专项水库滑坡涌浪风险评估的目的、对象和内容, 定义了滑坡涌浪风险评估、风险管控等相关概念。

(2) 借鉴滑坡和海啸风险评估的技术体系, 首次构建了水库滑坡涌浪风险评估的技术框架流程, 包括风险评估范围界定、涌浪危险分析、易损性分析、涌浪风险估计和涌浪风险划分这 5 个分析步骤。

(3) 以三峡库区巫峡板壁岩崩塌隐患点为例, 定量分析了 145 和 175 m 水位下滑坡涌浪的危险区域和以船只为主的承灾体易损性, 区划出约 7 km 长的涌浪风险河道。

(4) 从板壁岩涌浪风险计算来看, 降低水库区滑坡涌浪风险可以从控制涌浪大小和降低承灾体的易损性 2 个方面着手。控制涌浪大小可以考虑对崩

滑体进行控制或对涌浪传播进行主动消减。降低承灾体的易损性, 则可考虑提高承灾体的抵抗能力或通航秩序。

水库滑坡涌浪风险评估方法尚处发展过程中, 更多的技术细节和标准需要进行一步的研究讨论。

### 参考文献(References):

- [1] 中国新闻网. 三峡船闸 2016 年通过量达 1.3 亿吨, 创历史最高纪录 [DB/OL]. 2017, <http://www.chinanews.com/cj/2017/01-06/8116159.shtml>, 2017-01-06. (China News. The Passing amount of Three Gorges ship lock reached 1.3 million tons in 2016, the highest record in history [DB/OL]. 2017, <http://www.chinanews.com/cj/2017/01-06/8116159.shtml>, 2017-01-06. (in Chinese))
- [2] HUANG B, YIN Y, DU C. Risk management study on impulse waves generated by Hongyanzi landslide in Three Gorges Reservoir of China on June 24, 2015[J]. *Landslides*, 2016, 13(3): 603 - 616.
- [3] HELLER V, WILLI H H, MINOR H E. Landslide generated impulse waves in reservoirs[R]. Zurich: VAW, ETH, VAW Publikationen, 2009.
- [4] HUANG B, YIN Y P, WANG S C, et al. A physical similarity model of an impulsive wave generated by Gongjiatang landslide in Three Gorges Reservoir, China[J]. *Landslides*, 2014, (11): 513 - 525.
- [5] ATAIE-ASHTIANI B, MALEK M S. Near field amplitude of subaerial landslide generated waves in dam reservoirs[J]. *Dam Engineering*, 2007, 17(4): 197 - 222.
- [6] 黄波林, 王世昌, 陈小婷, 等. 碎裂岩体失稳产生涌浪原型物理相似试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(7): 1 417 - 1 425. (HUANG Bolin, WANG Shichang, CHEN Xiaoting, et al. Prototype physical similarity experimental study of impulsive wave generated by cataclastic rockmass failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1 417 - 1 425. (in Chinese))
- [7] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪 洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验[J]. *地球科学*, 2012, 37(5): 1 067 - 1 074. (YIN Kunlong, LIU Yiliang, WANG Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in three gorges reservoir[J]. *Earth Science*, 2012, 37(5): 1 067 - 1 074. (in Chinese))
- [8] CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D. Landslide spreading, impulse water waves and modelling of the vajont rockslide[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(6): 1 - 24.
- [9] HARBITZ C B, GLIMSDAL S, LØVHOLT F, et al. Rockslide tsunamis in complex fjords: From an unstable rock slope at Åkerneset to tsunami risk in western Norway[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 88: 101 - 122.
- [10] GABL R, SEIBL J, GEMS B, et al. 3D numerical approach to simulate the overtopping volume caused by an impulse wave comparable to avalanche impact in a reservoir[J]. *Natural Hazards Earth System Science*, 2015, 15(12): 2 617 - 2 630.
- [11] ZHAO T, UTILI S, CROSTA G B. Rockslide and impulse wave modelling in the Vajont Reservoir by DEM-CFD Analyses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 49(6): 2 437 - 2 456.
- [12] XING A, XU Q, ZHU Y, et al. The August 27, 2014, rock avalanche and related impulse water waves in Fuquan, Guizhou, China[J]. *Landslides*, 2016, 13(2): 411 - 422.
- [13] WATTS P, GRILLI S T, KIRBY J T, et al. Landslide tsunami case studies using a Boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model[J]. *Natural Hazards Earth System Science*, 2003, 3(5): 391 - 402.
- [14] ATAIE-ASHTIANI B, MALEK-MOHAMMADI S. Mapping impulsive waves due to subaerial landslides into a dam reservoir: a case study of Shafa-Roud Dam[J]. *Dam Engineering*, 2008, 18(3): 1 - 25.
- [15] 李红英, 谭跃虎, 李二兵. 库区单体滑坡灾害风险定量评估研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(增 2): 2 040 - 2 046. (LI Hongying, TAN Yuehu, LI Erbing. Research on quantitative of landslide assessment disaster risk in reservoir area of Kala hydropower station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(Supp.2): 2 040 - 2 046. (in Chinese))
- [16] 纪 虹, 司 鹤. 基于 GIS 技术的三峡库区滑坡涌浪灾害易损性可视化研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(9): 166 - 171. (JI Hong, SI Hao. Visualized analysis of surge vulnerability by landslides based on GIS in Three Gorges Reservoirs[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(9): 166 - 171. (in Chinese))
- [17] 吴树仁. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 8 - 75. (WU Shuren. *Theory and technology of landslide risk assessment*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 8 - 75. (in Chinese))
- [18] 张茂省, 董 英, 孙萍萍, 等. 基于水位的赵家岸滑坡风险分析与控制[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(1): 123 - 127. (ZHANG Maosheng, DONG Ying, SUN Pingping, et al. Risk analysis and control of the Zhaojiaan landslide through controlling water levels[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(1): 123 - 127. (in Chinese))
- [19] 向喜琼, 黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. *地质灾害与环境保护*, 2000, (1): 38 - 41. (XIANG Xiqiong, HUANG Runqiu. Risk assessment and risk management for slope geohazards[J]. *Chinese Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2000, (1): 38 - 41. (in Chinese))
- [20] GALLI M, GUZZETTI F. Landslide Vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy[J]. *Environmental Management*, 2007, 40(4): 649 - 664.
- [21] BAUM R L, COE J A, GODT J W, et al. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA[J]. *Landslides*, 2005, 2(4): 266 - 279.
- [22] HO K K S, LEROI E, ROBERDS B. Quantitative risk assessment-application, myths and future direction[C]// *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. [S. l.]: [s. n.], 2000: 269 - 312.

- [23] JELINEK R, KRAUSMANN E, GONZALEZ M, et al. Approaches for tsunami risk assessment and application to the city of Cadiz, Spain[J]. *Natural Hazards*, 2012, 60(2): 273 - 293.
- [24] ZEYNEP C C, MEHMET L S, AHMET C Y, et al. A new GIS-based tsunami risk evaluation: MeTHuHVA (METU tsunami human vulnerability assessment) at Yenikapı, Istanbul[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 133 - 154.
- [25] CRICHTON D. *Natural disaster management*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1999: 102 - 103.
- [26] OPPENHEIMER D, RHOADES J, ROBERTS M, et al. National tsunami hazard mitigation program 2009-2013 strategic plan[R]. [S. l.]: Silver Spring, 2009: 34.
- [27] BARBEROPOULOU A, LEGG M R, USLU B, et al. Reassessing the tsunami risk in major ports and harbors of California I: San Diego[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(1): 479 - 496.
- [28] SATO H, MURAKAMI H, KOZUKI Y, et al. Study on a simplified method of tsunami risk assessment[J]. *Natural Hazards*, 2003, 29(3): 325 - 340.
- [29] CHARALAMPAKIS M, STEFATOS A, FERENTINOS G, et al. Towards the mitigation of the tsunami risk by submarine mass failures in the gulf of Corinth: the Xylocastro resort town case study[M]. [S. l.]: Springer Netherlands, 2007: 367 - 375.
- [30] Australian Geomechanics Society. *Landslide risk management concepts and guidelines*[J]. *Australian Geomechanics*, 2000, 5(1): 49 - 92.
- [31] HUANG B L, CHEN L D, PENG X M, et al. Assessment of the risk of rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China[J]. *Landslides*, 2010, 7(1): 1 - 11.
- [32] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱和度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1 625 - 1 631. (DENG Huafeng, YUAN Xianfan, LI Jianlin, et al. Experimental research on influence of saturation degree on sandstone longitudinal wave velocity and strength[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1 625 - 1 631.(in Chinese))
- [33] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(6): 822 - 827. (TANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, WANG Sijing. Testing study on effects of chemical action of aqueous solution on crack propagation in rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 822 - 827.(in Chinese))
- [34] 王思敬, 马凤山, 杜永廉. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. *工程地质学报*, 1996, 4(3): 1 - 9. (WANG Sijing, MA Fengshan, DU Yonglian. Water rock interaction in reservoir area and its geological environment influence[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(3): 1 - 9.(in Chinese))
- [35] HSÜ K J. Catastrophic debris streams(sturzstroms) generated by rockfalls[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86(1): 129 - 140.
- [36] NODA E. Water waves generated by landslides[J]. *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division ASCE*, 1970, 96(WW4): 835 - 855.
- [37] SLINGERLAND R L, VOIGHT B. Occurrences, properties and predictive models of landslide-generated impulse waves[J]. *Rockslides and Avalanches*, 1979, (2): 317 - 397.
- [38] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980: 120 - 129. (PAN Jiazheng. *Stability against sliding and landslide analysis of buildings*[M]. Beijing: China Hydraulic Press, 1980: 120 - 129.(in Chinese))
- [39] LANG T E, DAWSON K L, MARTINELLI M. Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow. Part I. development of computer program avalanche[J]. *Journal of Glaciology*, 1979, 22: 107 - 115.
- [40] HUNGR O. A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(4): 610 - 623.
- [41] 汪洋, 殷坤龙, 刘艺梁, 等. 考虑水阻力的涉水滑坡运动速度计算模型研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(6): 903 - 908. (WANG Yang, YIN Kunlong, LIU Yiliang, et al. Model test speed model of fording landslide taking into account water resistance[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(6): 903 - 908.(in Chinese))
- [42] 黄波林, 殷跃平, 刘广宁, 等. 三峡库区龚家方崩滑体涌浪物理原型试验与数值模拟对比研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增 1): 2 677 - 2 684. (HUANG Bolin, YIN Yueping, LIU Guangning, et al. Comparison study of physical prototype model test and numerical simulation of Gongjiafang landslide in three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Supp.1): 2 677 - 2 684.(in Chinese))
- [43] WISNER B, BLAIKIE P, CANNON T, et al. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*[M]. [S. l.]: Routledge, 2004: 11 - 16.
- [44] BIRKMANN J. *Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies*[M]. New York: United Nations University Press, 2006: 962 - 964.
- [45] THYWISSEN K. *Core terminology of disaster reduction: a comparative glossary*[C]// BIRKMANN J ed. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards*. Tokyo: UNU Press, 2006: 448 - 496.
- [46] BIRKMANN J, VON TEICHMAN K, WELLE T, et al. The unperceived risk to Europe's coasts: tsunamis and the vulnerability of Cadiz, Spain[J]. *Natural Hazards Earth System Science*, 2010, (10): 2 659 - 2 675.
- [47] RYNN J, DAVIDSON J. Contemporary assessment of tsunami risk and implication for early warnings for Australia and its island territories[J]. *Sci Tsunami Hazards*, 1999, 17(2): 107 - 125.
- [48] GRANGER K, JONES T, LEIBA M, et al. *Community risk in cairns: a multi-hazard risk assessment*[R]. Canberra: Australian Geological Survey Organization, 1999: 25 - 26.