

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220802003

## 三峡库区棺木岭危岩体涌浪风险防控研究\*

徐锦宏<sup>1</sup>, 黄波林<sup>2,3</sup>, 聂邦亮<sup>4</sup>, 许凯凯<sup>2,3</sup>, 李 滨<sup>5</sup>

(1. 湖北省地质灾害防治中心, 湖北 武汉 430034; 2. 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;  
3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 湖北省水文地质工程地质大队, 湖北 宜昌 443002;  
5. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 三峡库区棺木岭危岩体基座岩体强烈劣化, 稳定性持续下降, 潜在涌浪灾害严重威胁九畹溪漂流景区和长江航道的安全。本文围绕棺木岭危岩体涌浪风险防控问题, 开展了基于流固耦合数值模拟的危岩体涌浪危险性评估和涉水危岩体防治设计, 研究表明: 在景区旺季的145 m水位工况下, 棺木岭危岩体失稳可能产生的涌浪最大高度约为19.2 m, 在对岸九畹溪旅游码头最大爬坡高度约15.1 m, 长江干流最大涌浪爬高约1.6 m, 严重威胁约15 km的九畹溪航道和长江航道安全。针对危岩体处于偏心受压状态和消落区基座岩体劣化情况, 对其下部凹腔进行“模袋砼围堰+岩腔填充”的工程防治设计, 使得棺木岭危岩体稳定性系数从1.3提升至2.6。本次研究直接指导了棺木岭危岩体防治工程, 可为库区其他涉水危岩体涌浪风险防控提供借鉴。

**关键词:** 危岩体; 涌浪; 数值模拟; 岩腔填充; 防治工程

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1395-10

## Study on Risk Prevention and Control for Impulse Wave Generated by the Guanmuling Dangerous Rock Mass in the Three Gorges Reservoir Area

XU Jinhong<sup>1</sup>, HUANG Bolin<sup>2,3</sup>, NIE Bangliang<sup>4</sup>, XU Kaikai<sup>2,3</sup>, LI Bin<sup>5</sup>

(1. Hubei Center of Geological Disaster Control, Wuhan 430034, China;  
2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
4. Hubei Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Yichang 443002, China;  
5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The stability of the dangerous rock base of the Guanmuling in the Three Gorges Reservoir area continues to decline due to the severe deterioration of rock mass. Potential wave disaster induced generated by the rock mass collapse seriously threatens the safety of the Jiuwanxi drifting scenic spot and the Yangtze River waterway. This paper focuses on the risk assessment of dangerous rock wave and the prevention and control design of dangerous rock wave based on fluid-structure coupling numerical simulation. The results show that: Under the condition of the reservoir water level of 145 m in tourism peak season, the maximum possible height of wave generated by the dangerous rock mass in-

\* 收稿日期: 2022-08-02; 修回日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077234)资助

作者简介: 徐锦宏(1989—), 男, 工程师, 硕士。主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 474674555@qq.com

通讯作者: 黄波林(1979—), 男, 研究员, 博导。主要从事水库地质灾害与滑坡涌浪研究。E-mail: 344043292@qq.com

stability in Guanmuling is about 19.2 m, with the maximum ascending height of the Jiuwanxi tourism wharf on the opposite side of 15.1 m, and the Yangtze River of 1.6 m, which seriously threatens the safety of these waterway about 15 km. In view of the dangerous rock mass under eccentric compression and the deterioration of the base rock mass in the fluctuation zone, the engineering prevention and control design of "bag concrete cofferdam + rock cavity filling" was carried out on the lower cavity of the dangerous rock mass, which increased the stability coefficient of the Guanmuling dangerous rock mass from 1.3 to 2.6. This study contributes directly to the prevention and control project of dangerous rock mass in Guanmuling, also provides reference for the risk prevention and control of wave generated by other dangerous rock masses in the reservoir area.

**Keywords:** dangerous rock mass; impulse wave; numerical simulation; cavity filling; prevention and control engineering

## 0 引言

在悬崖海岸带和水库峡谷区有许多大型岩柱状危岩,悬崖柱状危岩体因基座岩体压裂而失稳解体会形成碎屑崩塌入水,产生灾难性涌浪,威胁航道和沿岸人民的生命财产安全;如挪威洛恩湖崩塌-涌浪事件<sup>[1]</sup>。因此有许多学者对柱状危岩体的失稳过程进行了研究,柱状危岩的崩塌动力过程与颗粒柱体的复杂崩塌现象类似<sup>[2]</sup>;王健<sup>[3]</sup>通过室内试验模拟了柱状危岩在有水与无水的破坏,得出了柱体高宽比与水深会改变危岩破坏模式;W. Sarlin等<sup>[4]</sup>进行了临水柱状颗粒崩塌实验,结果表明崩塌颗粒体以类似活塞的方式使水面发生变化,其运动模式取决于柱体高度和高宽比;当柱状危岩体与水体相距较远时,涌浪往往由危岩体在斜坡上解体产生的碎屑流激发,与涉水柱状危岩体不同的是其具有一定的冲击速度及角度,S. Viroulet等<sup>[5]</sup>的实验结果表明颗粒体本身的休止角和滑面角度也会影响涌浪波高。

对柱状危岩体的涌浪数值模拟也常常被用于滑坡涌浪预测中。W. C. Mih等<sup>[6-7]</sup>通过剪切颗粒流实验得到的粒间剪应力公式直接作为颗粒流数值模拟的控制方程得到应用。H. M. Fritz等<sup>[8]</sup>和S. Viroulet等<sup>[5]</sup>的实验过程及结果也经常用于验证数值模拟准确性<sup>[9-10]</sup>。数值模拟由于没有尺寸和边界条件的限制,在准确性得到保证时可对实际涌浪事件进行全过程模拟,模拟结果也可进一步用于涌浪危险性分析和为涌浪风险防控设计提供依据。霍志涛等<sup>[11]</sup>通过水波动力学数值模拟软件FAST建立滑坡-涌浪模型,模拟了175 m水位下三峡库区黑

石板滑坡的涌浪传播过程;J. Wang等<sup>[12]</sup>通过FDEM获取滑坡运动参数并将作为控制参数进行了SPH的涌浪过程模拟;B. L. Huang等<sup>[13]</sup>以全耦合的数值模型计算了唐家溪滑坡的运动特征及涌浪传播。根据涌浪波高在流域范围内的分布特征可进行针对性的涌浪风险预测及防控,以往部分学者通过不同工况下数值模拟进行了涌浪风险的概率分析及评估,并取得了较好的结果<sup>[14-15]</sup>。

在涌浪风险防治方面,针对涌浪灾害主要集中在对涌浪波高和爬高的的防治,如在河道布置消浪结构物或在岸边设置消浪堤<sup>[16-18]</sup>。尽管这些措施在一定程度上减小了涌浪风险性,但中断航道和对较为脆弱的承灾体及重要设施的威胁仍不容忽视。因此采用传统的滑坡崩塌防治措施也是需要考虑的选项,在根本上杜绝涌浪产生从而达到灾害防治的效果。

本文以棺木岭危岩体为例采用数值模拟方法计算了危岩体崩塌产生涌浪的影响范围并进行了危险性分析。鉴于长江主航道的重要性,结合棺木岭危岩体的结构特点,对危岩体本身进行防治工程设计从而达到减小涌浪风险的目的。这可为库区其他涉水危岩体涌浪风险防控提供借。

## 1 棺木岭危岩体概况

棺木岭危岩体位于三峡库区九畹溪左岸棺木岭陡崖处(图1),九畹溪漂流终点旅游码头对面,距下游三峡大坝(秭归县城)约18.5 km,距离河口长江主航道1.2 km。该地气候属于亚热带季风性气候区,多年平均降水量为1 493.2 mm,日最大降水量达到358 mm。

棺木岭危岩体区域地理位置位于新华夏构造体系鄂西隆起带北端和淮阳山字型构造体系的复合部位,构造主要为仙女山断裂和九畹溪断裂组成,近平行向展布。主要控制裂隙有四条:裂隙①:  $275^{\circ}/\perp$ ,裂面平直,延伸稳定,大于10 m,裂隙发育密度1条/2 m;裂隙②:  $355^{\circ}/W \angle 60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,裂面起伏,延伸稳定,大于5 m,裂隙发育密度1条/5 m;上述两组裂隙为区域大裂隙,控制了陡崖冲沟走向。危岩体裂缝均沿此两组张开而成;裂隙③、④:  $140^{\circ}/\perp$ ,  $45^{\circ}/NE \angle 75^{\circ}$ ,裂面平直,裂隙延伸长0.3~3 m不等,密度3~5条/m,为共轭剪切裂隙。四组裂隙相互切割,岩体破碎,呈块状,岩体完整性较差。

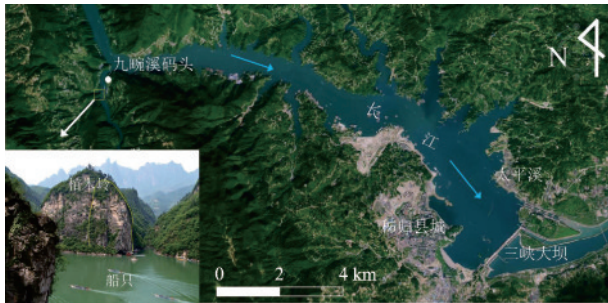


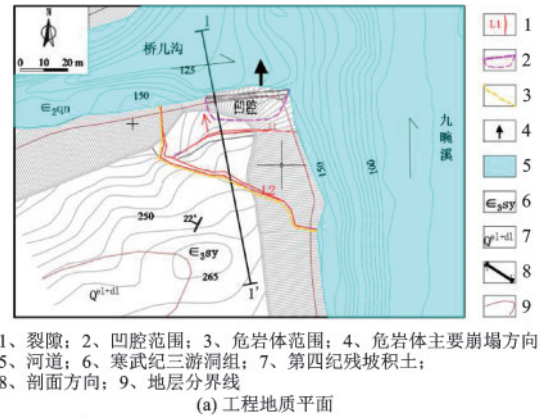
图1 棺木岭地理位置示意

Fig.1 Geographical location of the Guanmuling rock mass

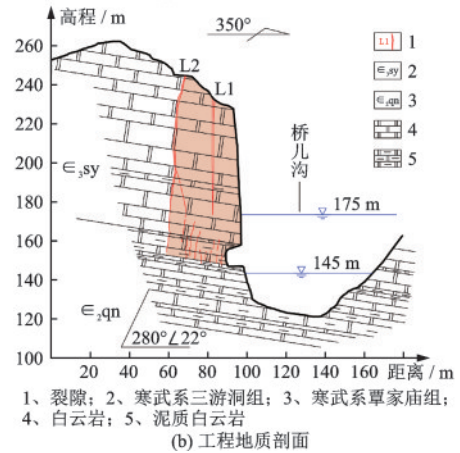
棺木岭危岩区属构造侵蚀、溶蚀低中山区,周边地形陡峻,植被茂密,地形切割剧烈,沟谷多为呈“V”字型。区内地形地貌明显受构造岩性控制,主河流九畹溪沿断裂平行构造主线发育,近南北流向,支流多沿主控构造裂隙发育,近东西或北西、北东向;区内奥陶系、寒武系白云岩、灰岩多形成悬崖陡壁,上部志留系砂页岩地层形成斜坡,坡度一般  $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ,二者形成明显的分界线。

棺木岭地层分布为覃家庙组( $E_2qn$ )、三游洞组( $E_3sy$ )及第四系残坡积物( $Qel+d1$ ),基底由下往上分为薄层状白云岩、薄层状泥质白云岩和厚层白云岩;底部基座为薄层状白云岩、薄层状泥质白云岩含泥质条带;陡岩山体为性脆坚硬的中-厚层白云岩;山顶为第四系残坡积碎石土(图2)。

危岩体发育在寒武系白云岩形成的陡崖上棺木岭发育两条大型裂缝,后缘边界为L2,中间发育L1大型裂隙(图2)。L1裂缝产状  $175^{\circ}/\perp$ ,地面延伸长约41 m,裂面平直,裂缝宽0.2~1.0 m,可见深度约1.5 m,下部碎石土充填。L1与东侧崖面几乎垂直,分布高程155~225 m,陡崖上可见延伸长



1、裂隙; 2、凹腔范围; 3、危岩体范围; 4、危岩体主要崩塌方向; 5、河道; 6、寒武纪三游洞组; 7、第四纪残坡积土; 8、剖面方向; 9、地层分界线  
(a) 工程地质平面



1、裂隙; 2、寒武系三游洞组; 3、寒武系覃家庙组; 4、白云岩; 5、泥质白云岩  
(b) 工程地质剖面

图2 秭归棺木岭危岩体工程地质平剖面

Fig.2 Engineering geology map and section 1-1' of the Guanmuling dangerous rock mass in Zigui

70 m,切深可见1~2 m。L2裂缝产状  $205^{\circ}/\angle 85^{\circ}$ ,裂面平直,分布高程156~245 m,张开宽度约1~3 m,上宽下窄,地面延伸长约55 m,崖壁面上延伸高度76 m,可见深度1~2。

据现场调查,危岩体下方发育一套含泥质条带的薄层泥质白云岩夹厚层白云岩,沿层面形成高约10 m的岩腔(岩屋),长约32 m,深度达8~10 m。该岩腔使得上部L1切割形成的次级危岩体近1/2悬空。在岩腔边缘,受上覆岩体自重作用下,呈现出压裂、边帮脱落、掉块等变形。

三峡水库蓄水后在浪蚀作用下,岩腔进一步扩大,岩腔顶部10 cm向内掏蚀近50 cm(图3),危岩体崩塌危险进一步加剧。同时危岩体基座岩体3~5 m厚度范围内的,压裂破碎严重(图4),并见新鲜断面,说明近期基座应力集中区岩体所承受压力处于极限状态,岩体向外鼓胀,致使L1裂缝中部宽度扩大,在劣化作用影响下,裂缝有进一步扩宽和向岩体深部延伸的趋势,从而诱发次级危岩整体失稳破坏。



图3 棺木岭危岩体凹腔形态

Fig.3 Picture of cavity morphology of the Guanmulin dangerous rock mass



图4 棺木岭基座岩体压裂破碎

Fig.4 Picture of fracturing base of the Guanmuling rock mass

基座岩体受上部荷载持续作用下处于类似单轴抗压状态,导致基座岩体压裂,而由于下部掏蚀区使部分基座处于临空状态,使基座岩体处于偏心受压状态,使得危岩体纵向裂缝有进一步发育空间;此外由于库水位变动的影 响,下部岩体不断的经历干湿循环所引起的岩体劣化作用,将会不断弱化下部岩体强度。由此可见,危岩体基座会在重力作用下被压溃,随着基座岩体的破坏纵向裂缝也会进一步拓展,导致下部凹腔与后缘裂缝继续扩大,最终危岩体将会出现倾倒滑移或者基座压裂座滑的破坏模式<sup>[19]</sup>。从整体稳定性来看,由于下部破碎带和后缘L2裂缝的存在,极大可能将会导致冠木岭危岩的主体部分发生崩塌坠落,使得L2裂缝至临江侧危岩体全部入水产生涌浪。

## 2 涌浪危害分析

### 2.1 数值模型构建

依据棺木岭地区地形数据,建立了颗粒流-水体耦合数值模型。地形DEM主要采用1:10 000地形图,河床高程为给定的平均高程值,棺木岭附近河

床高程为70 m,综合形成计算地形。模拟计算区域长约9 200 m,宽约6 000 m,计算高程为20~250 m之间。利用了多重网格技术,以增加涌浪产生区计算精度和减少全局计算量。九畹溪支流及长江河口区域采用6 m×6 m×6 m的网格单元,紧邻的长江上下游区域采用12 m×12 m×12 m的网格单元,计算单元总数为17 769 028个(图5)。

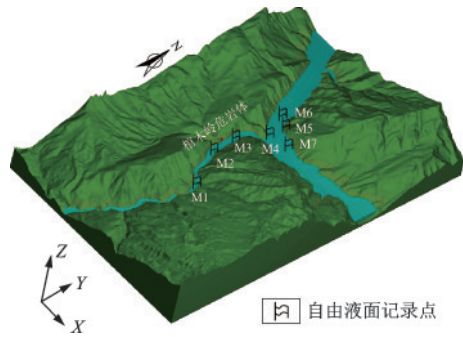


图5 棺木岭危岩体涌浪数值模型

Fig.5 Numerical model for impulse wave generated by the Guanmuling dangerous rock mass

计算区域内长江呈“L”形展布,长约6.9 km。九畹溪总体呈南北向展布,长约8.2 km。计算区地貌为典型“V”形峡谷地貌,山高水深,水力坡降大,河道蜿蜒。九畹溪上游的河谷非常狭窄,大多河面宽度在100 m左右(175 m水位时)。

考虑到涌浪传播时间,河流上下游均设置为wall边界,山体为零流量边界,水表面为自由液面。全场重力加速度设置为9.8 m/s<sup>2</sup>。初始状态时棺木岭危岩体和水体均为静止状态。根据相关计算参数经验<sup>[20-21]</sup>,模拟棺木岭危岩体的颗粒设置其密度为2 860 kg/m<sup>3</sup>,整体孔隙率设为0.002,休止角为34°,摩擦角为36°。颗粒间的流体设置为水。

### 2.2 危岩体涌浪过程与危险性分析

在上述棺木岭危岩体模型下,分析了棺木岭危岩体运动及145 m、175 m工况下的涌浪传播。棺木岭危岩主体运动朝向桥儿沟方向,少部分落入九畹溪;因此主要运动堆积的区域是桥儿沟与九畹溪交汇的沟口,在水体和重力作用下又朝桥儿沟上游和九畹溪内流动堆积。

在145 m水位工况下,在t=4 s时开始出现较明显运动,最大速度约25.4 m/s。在t=6 s时,已经出现朝桥儿沟上游的堆积运动。在t=8 s时,九畹

溪干流侧物质基本完全入江,危岩体沿桥儿沟入江的速度最大达到33.1 m/s。在 $t=10$  s时,危岩体基本完全进入桥儿沟和九畹溪内,仅在危岩体斜坡上存在少量物质运动。

约6 s时危岩体碎屑入江,河道内开始产生涌浪波,最大涌浪高度约为19.2 m,位于桥儿沟对岸河口位置。约8 s时涌浪传至对岸并形成爬坡浪,最大爬坡浪高约为6.5 m;此时,涌浪主要沿左岸传播,河道内最大涌浪高度为14.0 m。约14 s时,在对岸形成最大爬高浪,最大爬高约15.1 m。约20 s后涌浪的环状传播基本结束,开始朝上下游呈平行传播

衰减;此时下游涌浪最大高度约4.8 m,上游涌浪最大高度约2.4 m,涌浪爬高明显高于河道传播浪高。

约60 s时,涌浪开始从河口朝长江干流传播,再次形成环状传播,此时河口河道涌浪最大高度约2.1 m;九畹溪棺木岭下游最大浪高约为3.8 m,位于河岸附近,它是由第二波涌浪传播形成的;九畹溪棺木岭上游最大浪高约为2.5 m。约80 s时,涌浪抵达河口长江对岸,并开始朝长江的上下游传播;此时涌浪最大高度约0.8 m,最大爬高约为1.6 m。约100 s,涌浪在长江上呈平行传播,此时下游涌浪抵达庙河;此时涌浪最大高度约0.7 m(图6)。

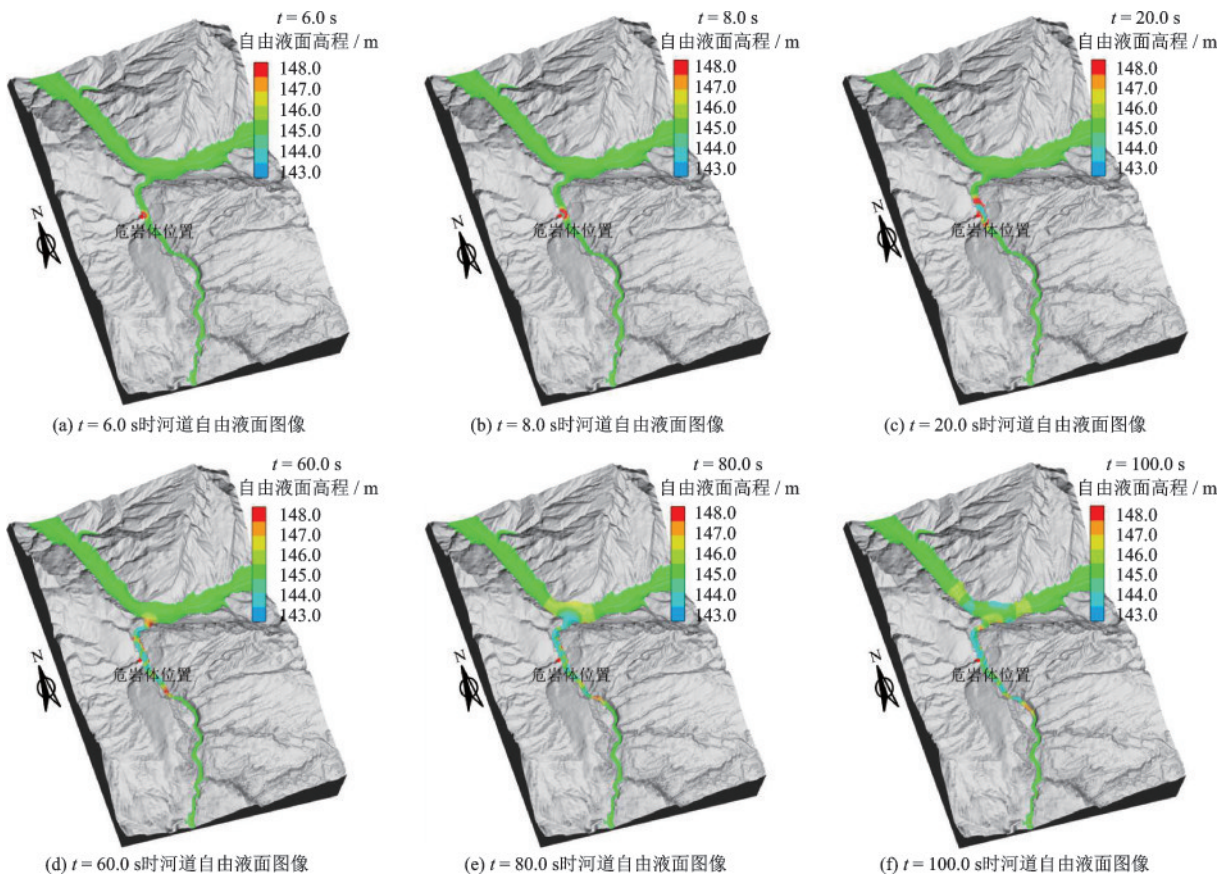


图6 145m水位时棺木岭涌浪过程

Fig.6 Wave process generated by the Guanmuling rock mass under the condition of the reservoir water level of 145 m

在175 m水位工况下,与145 m水位工况相比,175 m水位时运动速度变小,危岩体在10 s内完成了入水全过程,比145 m工况提前2 s。175 m工况下涌浪最大高度约8.8 m,对岸最大爬高约7.7 m。由于175 m水位工况下的水体体积远远大于145 m水位,所以传播过程中所损失的能量也大大增加,导致涌浪的高度与沿岸爬高均小于145 m水位工况下涌浪的高度与沿岸爬高。

为进一步了解涌浪的传播过程,通过分析各个监测点的水位数据做出涌浪衰减图。图7和图8为145 m和175 m水位工况时九畹溪上游至长江下游庙河段河道最大涌浪波高变化图,在棺木岭上下游约1 650 m(下游约1 200 m,上游约450 m)的急剧衰减区。上下游不对称的急剧衰减区与棺木岭危岩体崩塌方向有关,由于崩塌朝向350°,为河道下游;所以涌浪大部分朝向了河道下游进行传播。

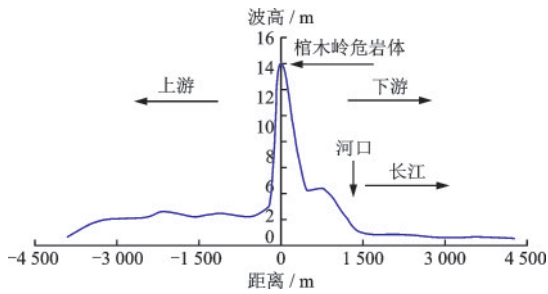


图7 145 m水位工况下棺木岭涌浪衰减图

Fig.7 Attenuation for wave impulse wave generated by the Guanmuling rock mass under the condition of the reservoir water level of 145 m

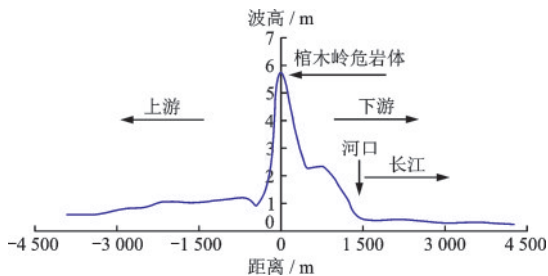


图8 175 m水位工况下棺木岭涌浪衰减图

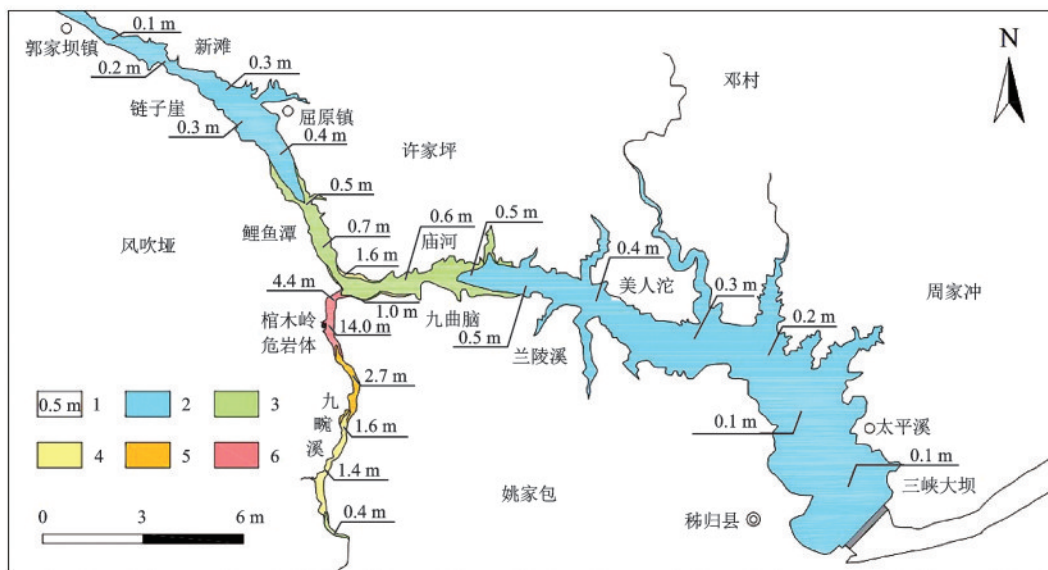
Fig.8 Attenuation for wave impulse wave generated by the Guanmuling rock mass under the condition of the reservoir water level of 175 m

145 m 水位工况下上下游的衰减率分别为 100 m 下降 2.64 m 和 0.98 m; 175 m 水位工况上下游的衰减率分别为 100 m 下降 1.09 m 和 0.44 m。涌浪经过急

刷衰减后,平缓衰减区的衰减非常缓慢,在长江下游 145 m 工况衰减率约为 100 m 下降 0.015 m; 175 m 工况衰减率约为 100 m 下降 0.007 m。在九畹溪上游 145 m 工况衰减率约为 100 m 下降 0.018 m; 175 m 工况衰减率约为 100 m 下降 0.021 m(图 8)。平缓衰减区的衰减率相差不大。涌浪衰减符合先快后慢的一般规律,也和其他滑坡涌浪衰减率具有类似性<sup>[22-23]</sup>。

根据数值模拟计算域内涌浪历史水位过程查询,可以获得计算域内河道沿程最大浪高分布情况。145 m 水位工况下计算域内棺木岭涌浪高度基本都大于 0.5 m。大于 3 m 的河道长约 1.6 km 长,以棺木岭至河口河道为主。涌浪波幅在 2~3 m 之间的河道长约 2.4 km,主要分布在九畹溪中游。涌浪波幅在 1~2 m 之间的河道长约 1.2 km,主要分布在九畹溪上游。计算域长江段河道内涌浪基本都小于 1 m,局部爬高大于 1 m。175 m 水位工况时涌浪高度明显小于 145 m 水位工况。

依据滑坡涌浪危险性评估规范<sup>[24]</sup>、中国国家海洋局《风暴潮、海浪、海啸和海冰灾害应急预案》规定,利用远区涌浪平缓衰减规律,将长江河道范围上游的涌浪传播衰减计算至郭家坝镇,下游的涌浪传播衰减计算至三峡大坝。图 9 展示了 145 m 水位工况下棺木岭危岩体潜在涌浪危害范围。以大于



1、最大涌浪波幅; 2、一般涌浪区; 3、涌浪蓝色预警区; 4、涌浪黄色预警区; 5、涌浪橙色预警区; 6、涌浪红色预警区

图9 145 m水位工况下棺木岭崩塌涌浪危害区域示意

Fig.9 Hazardous area of impulse wave generated by the Guanmuling rock mass under the condition of the reservoir water level of 145 m

0.5 m 波幅为界,145 m 工况下庙河至凤竹坪是长江航道主要危害区域,卷木岭至河口段是九畹溪航道主要危害区域。175 m 工况下河口两岸岸边是长江航道主要危害区域;其波高在 0.5~1.5 m 之间,以爬坡浪为主;卷木岭至河口段是九畹溪航道主要危害区域,波高均大于 0.5 m。

### 3 涌浪风险防控工程设计

#### 3.1 防治目标与工程设计

根据实物指标调查,棺木岭危岩以涌浪的致灾形式危害九畹溪旅游码头、九畹溪航道和长江航道安全,直接经济损失估算达 1 500 万元,长江封航造成的间接经济损失上亿元。根据《三峡库区三期地质灾害防治工程设计技术要求》防治工程级别划分,棺木岭危岩防治工程等级为 II 级。

棺木岭危岩体防治目标是确保危岩不发生整体崩塌,防止危石崩落、滚石,保障九畹溪旅游码头、航道和游客的生命财产安全以及长江航运安全。

根据防治目标,棺木岭危岩体防治工程设计为永久性工程,按安全营运年限不低于 50 年标准设计。防治工程等级为 II 级,防治工程设计安全系数取值 1.40。从防治工程设计工况来看,暴雨(20 年一遇)工况下棺木岭危岩体的稳定安全系数为 1.40;校核工况(50 年一遇暴雨)稳定安全系数取 1.30。由于区内地震基本烈度等于 VI 度,没有考虑地震荷载。

棺木岭危岩体三面环水,交通不便,没有陆路交通可以抵达。同时,棺木岭危岩体陡峻,施工区地形坡度较陡,植被较发育,从坡下无路到达危岩处,较难开展山体上的加固工程。需用趸船设置临时中转站,施工材料和机器用船转运。同时,目前棺木岭危岩体的主要变形因素为消落带的凹腔及岩体劣化造成的消落带破坏。因此,防治工程措施定为模袋砼围堰+岩腔填充+监测,同时对危岩采用主动防护网进行防护。即在岩腔外侧用模袋砼当围堰,腔内用 C20 砼进行填充(图 10、图 11)。这一方案利用膜袋围堰形成支撑柱,回填凹腔,对岩体劣化区进行混凝土封闭,有利于长期稳定。

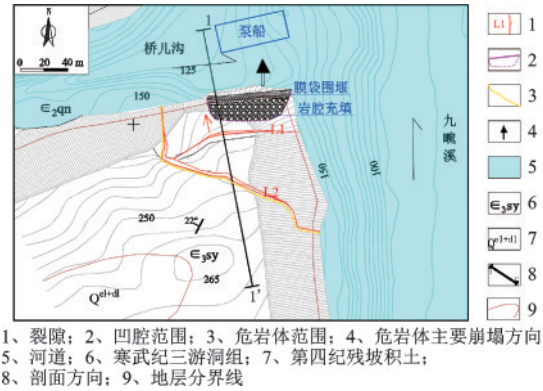


图 10 棺木岭防治措施剖面示意

Fig.10 Plan of control measurement for the Guanmuling dangerous rock mass

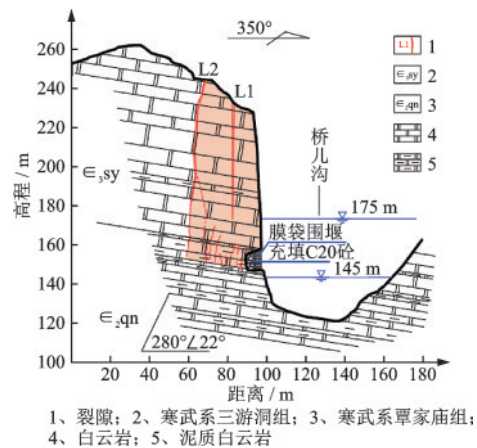


图 11 棺木岭防治措施平面示意

Fig.11 Cross section of prevention and control measurement for the Guanmuling dangerous rock mass

#### (1) 模袋砼围堰

采用模袋砼施工围堰,围堰宽度为 3 m,长度为 32 m,高度为 10 m。模袋采用矩形无滤点模袋,充实砼平均厚度为 300 mm,砼强度为 C20。模袋材料为涤纶、丙纶,单位面积质量 550 g/m<sup>2</sup>;垂直渗透系数为 5.26×10<sup>-2</sup>;等效孔径为 0.15 mm。模袋充填压力为 0.2~0.3 MPa。

将整捆的模袋在岩腔内全部摊开,沿岸线岩腔施工方向拉平均匀地摊铺土工模袋单元,并预留收缩余量。待外侧围堰形成后,清理岩腔,分段由低处向高处浇筑 C20 砼。砼浇筑采用拖泵,砼采用商品砼,施工前连接好拖泵泵管,施工机械设备的就位调试等。充灌速度控制在 8~12 m<sup>3</sup>/h 范围内,充灌压力控制在 0.2~0.3 MPa 范围内。

为增加模袋砼围堰的稳定性,每隔 3 m 高铺设一层宽 6 m,长 32 m 的土工格栅,共布置 3 层土工格栅(图 12)。

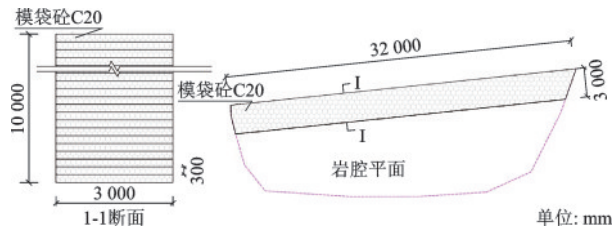


图 12 棺木岭危岩体防治工程膜袋围堰设计图

Fig.12 Design map of membrane bag cofferdam of prevention and control engineering for the Guanmuling dangerous rock mass

### (2)岩腔充填设计

围堰内的岩腔内用C20砼进行填充。粗骨料选用卵石或碎石,其粒径不大于40 mm。砂石料在本地或附近砂石料场购进。岩腔充填结构设计如图13所示。

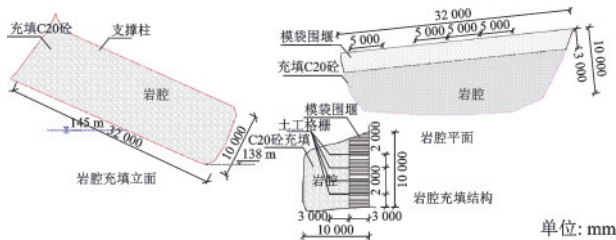


图 13 岩腔充填结构设计图

Fig.13 Design diagram of cavity filling structure

### 3.2 防治工程效果

利用棺木岭防治工程设计剖面图构建了防治后的有限元数值模型,以当前的最不利工况(50年一遇暴雨)进行了验算。利用C20混凝土回填后,棺木岭危岩体的变形减弱,稳定性急剧提升。从变形来看,凹腔回填后变形的数量级为 $10^{-9}$ ,亦即危岩体位移基本不再增加。从应力场来看,Y向应力场仅有非常局部区域存在轻微的应力集中现象,集中在危岩体的脚趾和脚踵部(图14)。利用SSR法分析了危岩体的稳定性,防治工程施工后稳定性系数达到2.6。SSRF=2.6时,塑性区和最大剪应发生为主为L1次级裂缝的基座区域(图15)。

从计算来看,棺木岭防治工程施工后的稳定系数(2.6)比防治前的稳定系数(1.3)有了非常大的提升,同时变形也得到了很好的控制。因此,回填岩腔封闭岩体劣化区域,可以有效提升类似柱状危岩体的稳定性,防止这些危岩体随着岩体劣化加速变形破坏。

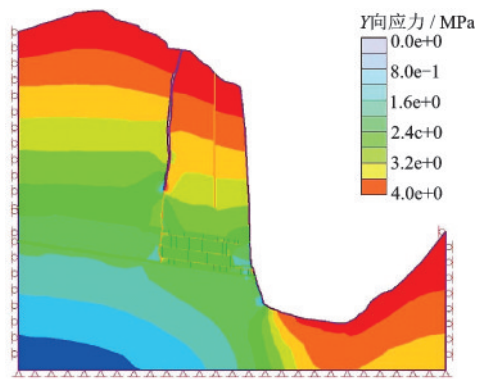


图 14 棺木岭 Y 向应力场分布示意

Fig.14 Distribution of Y-direction contour stress field of the Guanmuling rock mass

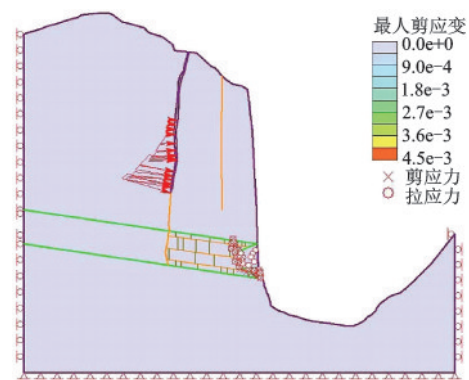


图 15 棺木岭 SSRF=2.6 时塑性区及最大剪应变云图

Fig.15 Contour of plastic zone and maximum shear strain of the Guanmuling rock mass at SSRF=2.6

## 4 结论与建议

本文针对三峡库区棺木岭危岩体涌浪风险防控进行了计算分析,并对涌浪传播区域与危害区域进行了划分,针对危岩体的变形破坏给出了防治建议:

(1) 棺木岭危岩体三维切割边界清晰,呈塔柱状,高约50 m、宽约50 m、厚约20 m,后缘发育两条深大裂隙,危岩体在上部岩体荷载作用与库水周期性变动作用下,下部基岩发生破碎,岩体强度不断弱化,由于凹腔的存在使整体处于偏心受压状态,最终将会形成倾倒滑移或者基座压裂座滑的破坏模式。

(2) 在145 m工况,最大涌浪高度为19.2 m,对岸涌浪最大爬坡高度为15.1 m,急剧衰减区内上下游传播时每百米衰减率为2.64 m和0.98 m;而

175 m 工况下最大涌浪高度为 8.8 m, 对岸涌浪最大爬坡高度为 7.7 m, 急剧衰减区内上下游传播时每百米衰减率为 1.09 m 和 0.44 m。

(3) 对九畹溪及附近长江部分区域进行了危险性分区, 145 m 工况下, 红色危害区分布在棺木岭周围 1.6 km; 橙色危险区长 2.4 km; 黄色危险区长 1.2 km; 175 m 工况下红色危害区分布在棺木岭周围 0.8 km; 橙色危险区长 0.6 km; 黄色危险区长 2.7 km。涌浪传播至长江后涌浪的高度低于 1 m, 属于中、低危险区(黄色、蓝色)。

(4) 针对棺木岭危岩下部基座破碎导致岩体处于的偏心受压状态, 下部凹腔使用水泥砂浆填充, 并采用主动防护网进行防护, 填充后经过数值计算, 其稳定性系数提升到了 2.6, 说明能够有效的防治。

## 参考文献:

- [1] Grimstad E, Nesdal S. The Loen rockslides: a historical review[J]. Norwegian geotechnical institute, 1991, 182: 1-6.
- [2] 贺凯, 殷跃平, 李滨, 等. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 86-92.  
He K, Yin Y P, Li B, et al. Analysis of collapse motion characteristics of tower columnar rock mass [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 86-92. (in Chinese)
- [3] 王健. 柱状危岩体崩塌-堆积-涌浪概化模型试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.  
Wang J. Experimental study on generalization model of collapse-accumulation-surge of columnar dangerous rock mass[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020. (in Chinese)
- [4] Sarlin W, Morize C, Sauret A, et al. Non-linear regimes of tsunami waves generated by a granular collapse [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2021, 919: R6.
- [5] Viroulet S, Sauret A, Kimmoun O, et al. Tsunami waves generated by cliff collapse: comparison between experiments and triphasic simulations [C]//Extreme Ocean Waves, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2016: 173-190.
- [6] Mih W C. High concentration granular shear flow [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(2): 229-248.
- [7] Haim Tsoar, Bagnold R A. 1941: The physics of blown sand and desert dunes [J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18(1): 91-96.
- [8] Fritz H M, Hager W H, Minor H E. Landslide generated impulse waves. [J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(6): 505-519.
- [9] 石传奇. 滑坡涌浪产生过程及近场特征的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
Shi C Q. Numerical study on the generation process and near-field characteristics of landslide surges [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [10] Gems B, Gabl R, Aufleger M, et al. 3-D numerical approach to simulate the overtopping volume caused by an impulse wave comparable to avalanche impact in a reservoir [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 15(12): 2617-2630.
- [11] 霍志涛, 黄波林, 张全, 等. 三峡库区黑石板滑坡涌浪分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 115-122.  
Huo Z T, Huang B L, Zhang Q, et al. Analysis of landslide surge of black stone slab in Three Gorges reservoir area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 115-122. (in Chinese)
- [12] Wang J, Wang S, Su A, et al. Simulating landslide-induced tsunamis in the Yangtze River at the Three Gorges in China [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(18): 2487-2503.
- [13] Huang B L, Yin Y P, Wang S C, et al. Analysis of the Tangjiaxi landslide-generated waves in the Zhexi Reservoir, China, by a granular flow coupling model [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, 17(5): 657-670.
- [14] Li Y, Chen L, Yin K, et al. Quantitative risk analysis of the hazard chain triggered by a landslide and the generated tsunami in the Three Gorges Reservoir area [J]. Landslides, 2021, 18(2): 667-680.
- [15] 王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 等. 单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害风险分析[J]. 地球科学, 2018, 43(3): 899-909.  
Wang F, Yin K L, Gui L, et al. Risk analysis of landslides and their secondary surges in monomer reservoirs [J]. Earth Science, 2018, 43(3): 899-909. (in Chinese)
- [16] 张全. 库区滑坡涌浪消减结构物消浪效率试验与典型案例应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.  
Zhang Q. Experiment on the efficiency of surge atwater reduction structures in reservoir area and typical case application [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021. (in Chinese)

- [17] 曹坤. 新型直立式消浪护岸结构的试验与数值研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
Cao K. Experiment and numerical study on the structure of new vertical wave suppression revetment [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
- [18] Goda Y. A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwaters [J]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 1973, 12 (3) : 31-69.
- [19] 闫举生, 谭建民. 三峡库区秭归县冠木岭危岩体发育特征及成因机制探讨 [J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(4): 347-353.  
Yan J S, Tan J M. Preliminary analysis on development characteristics and genetic mechanism of Guanmuling dangerous rock in Zigui County, Three Gorges Reservoir Area [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2018, 34(4): 347-353 (in Chinese)
- [20] 赵海林, 黄波林, 张全, 等. 柱状危岩体崩塌产生涌浪的物理试验与数值模拟分析 [J]. 地质力学学报, 2020 (4): 500-509.  
Zhao H L, Huang B L, Zhang Q, et al. Physical experiment and numerical simulation analysis of surge generated by collapse of columnar dangerous rock mass [J]. Journal of Geomechanics, 2020(4): 500-509. (in Chinese)
- [21] 郑嘉豪, 黄波林, 张全, 等. 三峡库区龙门寨危岩体崩塌产生涌浪研究 [J]. 地质力学学报, 2020 (4): 533-543.  
Zheng J H, Huang B L, Zhang Q, et al. Study on surges generated by the collapse of dangerous rock mass in Longmenzhai in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Geomechanics, 2020(4): 533-543. (in Chinese)
- [22] 汪定杨, 刘世凯. 长江新滩滑坡(1985年6月)涌浪调查研究 [J]. 人民长江, 1986(10): 26-29.  
Wang D Y, Liu S K. Study on the landslide of Xintan in the Yangtze River (June 1985) [J]. People's Yangtze River, 1986(10): 26-29. (in Chinese)
- [23] 殷坤龙, 杜鹃, 汪洋. 清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (12): 3267-3270.  
Yin K L, Du J, Wang Y. Analysis of landslide surge in Dayan Pond, Puya Reservoir Area, Qingjiang River [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (12): 3267-3270. (in Chinese)
- [24] 滑坡涌浪危险性评估规范: T/CSRME006—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
(本文编辑: 苏泽云)