

库区滑坡涌浪减灾措施研究现状与展望

谭青青, 马联华

重庆安全技术职业学院, 重庆 404121

DOI:10.61369/ETQM.2025060036

摘 要 : 滑坡涌浪会给库区周围居民的生命财产安全带来极大威胁, 为了更好地防治滑坡涌浪灾害, 本文聚焦库区滑坡涌浪减灾措施, 系统梳理滑坡涌浪产生、传播及爬高阶段减灾技术的研究进展, 分析各阶段减灾核心策略与技术手段, 总结现有研究成果与存在问题, 并对未来研究方向进行展望。研究表明, 当前库区滑坡涌浪减灾已形成较为完善的技术体系, 但在模型精度、监测技术及新型结构适应性等方面仍存在不足。未来需加强多物理场耦合机制研究、研发高精度监测设备、推动智能技术应用及新材料新结构创新, 以提升库区滑坡涌浪灾害防治水平。

关 键 词 : 滑坡涌浪; 减灾措施; 工程防护; 智能监测; 综述

Research Status and Prospects of Landslide-induced Wave Mitigation Measures in Reservoir Areas

Tan Qingqing, Ma Lianhua

Chongqing Vocational Institute of Safety Technology, Chongqing 404121

Abstract : Landslide-induced waves pose a significant threat to the safety of life and property of residents around reservoir areas. To better prevent and mitigate landslide-induced wave disasters, this paper focuses on mitigation measures for landslide-induced waves in reservoir areas. It systematically reviews the research progress of mitigation technologies in the generation, propagation, and climb stages of landslide-induced waves, analyzes the core mitigation strategies and technical means at each stage, summarizes existing research results and problems, and looks ahead to future research directions. The study shows that a relatively complete technical system has been formed for landslide-induced wave mitigation in reservoir areas, but there are still deficiencies in model accuracy, monitoring technology, and the adaptability of new structures. In the future, it is necessary to strengthen the study of multi-physical field coupling mechanisms, develop high-precision monitoring equipment, promote the application of intelligent technology, and innovate new materials and structures to improve the prevention and control of landslide-induced wave disasters in reservoir areas.

Keywords : landslide-induced waves; mitigation measures; engineering protection; intelligent monitoring; review

引言

随着我国高坝大库建设水平的持续提升, 包括三峡、锦屏、乌东德、白鹤滩等一系列世界级水利工程相继建成投运, 库区地质环境愈加复杂, 滑坡灾害及其次生涌浪问题逐渐成为影响工程安全与社会稳定的关键因素。滑坡涌浪是指滑坡体在重力、降雨、水位波动或地震等外力作用下迅速入水, 与水体发生强烈耦合形成的巨大波浪的过程^[1]。该灾害表现出突发性强、传播范围广、波浪冲击力大等特点, 常引发堤岸崩塌、护岸结构破坏、坝体冲刷甚至溃坝等灾害后果^[2]。历史上的多起滑坡涌浪灾害表明, 其破坏力往往远超原始滑坡本体。1963年意大利瓦依昂水库因滑坡引发250m高涌浪并漫顶, 造成近2000人死亡^[3]; 1985年三峡库区新滩镇滑坡触发49m高涌浪, 导致10人死亡^[4]; 2009年澜沧江小湾滑坡致30m涌浪, 14人失踪^[5]; 此外, 锦屏、乌东德等新建水电工程周边亦多次出现滑坡体不稳定迹象。

滑坡涌浪的形成过程复杂且多阶段演化, 按灾害发展路径可划分为产生阶段(滑体入水并初始激发涌浪)、传播阶段(涌浪沿水体向外扩展)及爬高阶段(波浪冲击岸坡或建筑结构)。在产生阶段, 滑体的体积、形态、入水速度与入水角度等关键参数决定了初始波高与能量释放强度; 传播阶段中, 涌浪在不规则岸线、水深变化及水体扰动的共同作用下发生反射、折射等, 导致传播路径和波形复杂

基金项目: 重庆市万州区科研项目(wzstc20230302)

作者简介: 谭青青(1995-), 女, 硕士, 助教, 研究方向: 灾害防治。

化；在爬高阶段，波能集中作用于岸坡或设施结构，形成瞬态高压冲击，极易诱发次生滑移、冲毁结构甚至产生灾害链响应。图1展示了滑坡涌浪全过程的动力学特征^[9]。各阶段的波动特性，动力机制与减灾措施重点各不相同，需分阶段精准干预。

当前，国内外学者在滑坡涌浪数值模拟、物理实验、成因机制和减灾措施方面积累了大量成果，逐步构建起“预测-响应-防控”一体化技术体系。然而，在库区多变地质与复杂水文条件下，现有模型对滑体入水过程、瞬态波传播与岸坡响应的适应性仍显不足，实际工程中减灾措施的可靠性和适应性亦需提升。因此，本文围绕滑坡涌浪三个典型阶段，系统梳理当前减灾措施研究现状，明确各类技术路径与适用边界，并提出多源监测、智能响应、韧性结构等未来研究方向，为库区滑坡涌浪灾害的系统防治与科学治理提供理论依据与工程参考。

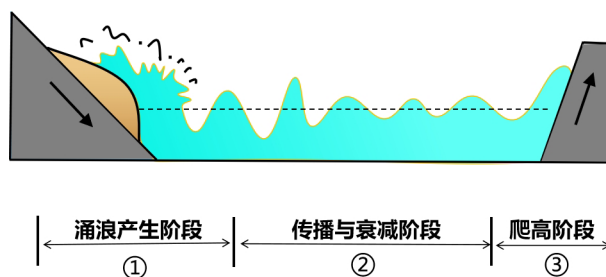


图1 滑坡涌浪过程示意图

一、滑坡涌浪产生阶段的减灾措施

滑坡涌浪的产生阶段减灾关键在于源头控制与能量调节，其核心目标是通过控制滑坡体的入水速度与体积，以削弱造浪能力，减少涌浪灾害的发生概率和强度。当前研究主要聚焦于滑坡体稳定性控制与入水行为调节两类策略。

滑坡体稳定性控制构成涌浪灾害防控的首要环节。工程加固措施是常用的有效手段，其中抗滑桩、锚索支护与地下排水系统等应用最为广泛。Chen等^[7]通过数值模拟研究发现，三峡库区树坪滑坡实施前缘压脚工程后，其最大位移速率从18.5 mm/d降至0.5 mm/d，潜在涌浪高度下降约64%。显著改善了灾害风险水平。此外，近年来生物工程手段也受到重视，Bagheri等^[8]研究表明，在粉质土中添加3%木质素可使抗剪强度提高约40%，对增强滑坡体抗扰动能力具有积极意义。地质灾害监测预警技术的发展为滑坡体稳定性控制提供了有力支持。许强等^[9]提出的“空-天-地”一体化地质灾害早期识别与监测体系整合了卫星遥感、无人机航测、地面监测等多种技术手段，该系统能有效提升对滑坡活跃区的动态监测与风险预判能力。

滑坡入水行为调节的目标在于控制滑体与水体之间的动能转换过程，以降低入水后初始涌浪的能量。拦滑带和引导槽是常用的工程措施。拦滑带通常由混凝土、钢材等材料构成，设置在滑坡体运动路径上，通过阻挡和缓冲作用降低滑体速度；引导槽则可引导滑体按照预定方向入水，避免滑体直接冲击重要设施。Huang等^[10]的物理实验表明，合理设置的拦滑结构可将滑体入水速度降低30%-50%，有效削弱了初始波高。缓冲池技术也在库区局部试点中展现出良好效果。Wang等^[11]报道，在某滑坡治理项目中，通过设置缓冲池，涌浪首波高度减少了约35%。缓冲池利用水体的缓冲作用，消耗滑体入水时的动能，从而降低涌浪高度。数值模拟技术为滑坡入水行为调节措施的优化设计提供了重要工具。Yu等^[12]开发的GIS三维涌浪计算模块，能够精准模拟不同防控方案下的涌浪参数，如波高、波长、传播速度等，为滑坡涌浪减灾工程的优化设计提供科学依据。

二、涌浪传播阶段的减灾措施

涌浪传播阶段的减灾关键在于实现能量耗散与波动引导，通

过改变库区地形或设置人工结构，削弱波浪能量的远距离传输效应，降低涌浪对沿岸设施和居民的威胁。现有研究主要围绕库区空间改造和人工消浪结构两类技术路径展开。

在库区空间调控方面，优化岸线与水下地形被视为经济高效的“被动消浪”策略。近岸缓坡布设是应用最为广泛的方法之一。Zhao等^[13]通过物理模型试验验证，设置1:3-1:5的缓坡可有效使波高衰减达50%-70%。在狭窄河谷库段中，布设波能引导通道具有良好效果。Deng等^[14]利用数值模拟发现，导流堤的合理布局可大幅减小涌浪对港口与岸坡设施的冲击强度。此外，部分研究还探索了水下沙坝的消能机制。Zhang等^[15]指出，适当设置沙坝可诱导波浪破碎过程，使波能减少超过30%。

人工消浪装置作为主动控制技术，是滑坡涌浪传播干预的重要方向。弧形消浪堤在多个工程中得到成功应用。Wang等^[16]报道，某水电站采用的复合型弧形堤将涌浪透射系数降低至0.3以下，显著改善了下游波动环境。在兼顾生态修复与防灾功能方面，透水护岸结构表现突出。Yuan等^[17]开发的圆筒框架浮式防波堤在保证50%以上的消浪率同时，还具备良好的水体交换能力。新型材料结构也在持续演化。Qiu等^[18]研制的超高分子量聚乙烯复合材料浮堤，具备优异的抗冲击性能，适用于高烈度涌浪区域。

三、涌浪爬高阶段的减灾措施

滑坡涌浪传播至岸坡后的爬高过程往往产生瞬态冲击，对岸坡稳定与护岸设施造成极大破坏。因此，该阶段的减灾关键在于构建高效的冲击防护体系与岸坡稳定保障机制。

护岸结构作为抵御波浪冲击的第一道屏障，其性能优化是减灾的关键环节。工程结构创新是当前研究的重点方向，其中弧形坡面组合式消浪堤、多孔介质消能结构和新型复合材料护面板等应用最为广泛。Huang等^[19]研发的S型聚叶捕能消波浮式防波堤，实验研究表明其透射系数可低至0.2-0.8，在波陡增加时消波性能显著提升，同时兼具波浪能捕获功能，展现了优异的综合性能。在材料选型方面，抗冲耐磨材料取得了新进展。Majcher等^[20]综述了多种电磁波吸收材料在护岸与抗冲击工程中的潜在应用价值，为结构功能集成提供了新思路。此外，Rahimi等^[21]提出基于数字孪生技术构建的响应式护岸系统，可实时监测波压与岸坡状

态,实现动态调控。

边坡加固技术重点应对爬高波浪诱发的坡体滑移与失稳问题。智能监测系统是保障边坡稳定的重要手段。Sun等^[22]利用光纤传感技术监测土工格栅加筋边坡的应变响应,其预警准确率达85%以上,为动态响应分析提供高时效监测手段。支挡结构创新方面,Wang等^[23]基于三维数值模拟建立了桩-梁组合结构模型,模拟显示该结构能将碎屑流冲击力削弱60%-80%。在生态可持续方向,Hong等^[24]提出的土袋加固方法在野外滑坡治理中展现出良好稳定性,且有利于植被恢复。

四、总结与展望

滑坡涌浪减灾研究是一个涉及地质力学、水动力学、材料科学和智能监测等多学科交叉的复杂系统工程。本文通过系统梳理滑坡涌浪产生、传播及爬高三阶段的减灾技术体系,揭示了当前研究在工程防护、智能监测和数值模拟等方面取得的显著进展。研究表明,虽然现有技术已在滑坡体稳定性控制(如抗滑桩加固)、波浪能量耗散(如S型浮式防波堤)和岸坡动态响应(如光纤传感监测)等关键环节形成有效解决方案,但仍存在理论研究与实际工程需求脱节、多场耦合机制认识不足等技术瓶颈。

参考文献

- [1]周家文,陈明亮,李海波,等.水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J].工程地质学报,2019,27(5):1131-1145.
- [2]Gaagai A, Boudoukha A, Benaabidate L. Failure Simulation of Babar Dam - Algeria and its Impact On the Valley Downstream Section[J]. Journal of Water and Land Development, 2020(44):75-89.
- [3]Panizzo A, De Girolamo P, Di Risio M, et al. Great Landslide Events in Italian Artificial Reservoirs[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005,5(5):733-740.
- [4]殷坤龙,姜清辉,汪洋.新滩滑坡运动全过程的非连续变形分析与仿真模拟[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):959-962.
- [5]石传奇,安翼,杨家修.滑坡涌浪的三维 Sph 方法模拟及其工程应用[J].中国科学:物理学,力学,天文学,2015(10):52-60.
- [6]Yavari-Ramshe S, Ataie-Ashtiani B. Numerical Modeling of Subaerial and Submarine Landslide-Generated Tsunami Waves—Recent Advances and Future Challenges[J]. Landslides, 2016,13(6):1325-1368.
- [7]Chen M, Lv P, Zhang S, et al. Time Evolution and Spatial Accumulation of Progressive Failure for Xinhua Slope in the Dagangshan Reservoir, Southwest China[J]. Landslides, 2018,15(3):565-580.
- [8]Bagheri P, Gratchev I, Zolghadr M, et al. Mitigation of Soil Erosion and Enhancement of Slope Stability through the Utilization of Lignin Biopolymer[J]. Polymers, 2024,16(9):1300.
- [9]侯燕军,周小龙,石鹏卿.“空-天-地”一体化技术在滑坡隐患早期识别中的应用—以兰州普兰太公司滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(06):12-19.
- [10]Huang Y, Zhang B. Challenges and Perspectives in Designing Engineering Structures Against Debris-Flow Disaster[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022,26(10):4476-4497.
- [11]Wang H, Lin Z, Xiao Y, et al. Ecological Risk Assessment of Landslide Disasters Based On Potential Loss of Ecosystem Services[J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao= the Journal of Applied Ecology, 2019,30(10):3553-3562.
- [12]Yu G, Zhou X, Bu L, et al. Gis-Based Calculation Method of Surge Height Generated by Three-Dimensional Landslide[J]. Scientific Reports, 2023,13(1):7684.
- [13]Zhao E, Mu L, Hu Z, et al. Physical and Numerical Investigations On Wave Run-Up and Dissipation Under Breakwater with Fence Revetment[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021,9(12):1355.
- [14]Bin D, Longbin Y, Jiaofeng H, et al. Three Dimensional Numerical Simulation of Wave Interaction with a New Type of Double Row Perforated Cylinder Breakwater[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023,55(4):845-857.
- [15]Zhang N, Zhang Q, Wang K, et al. Numerical Simulation of Wave Overtopping On Breakwater with an Armor Layer of Accropode Using Swash Model[J]. Water, 2020,12(2):386.
- [16]Wang J, Cheng Y Z, Yang X H, et al. Experimental Study On Wave Dissipation of New Plate Breakwaters[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015,19(1-2):86-94.
- [17]Yuan P Y, Zhao Y. Study On Wave Dissipation Performance of Cylindrical Frame Floating Breakwater[J]. Shipbuilding in China, 2022,63(5):197-205.
- [18]Qiu Y, Wu L, Liu S, et al. Impact-Protective Bicontinuous Hydrogel/Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene Fabric Composite with Multiscale Energy Dissipation Structures for Soft Body Armor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023,15(7):10053-10063.
- [19]Huang F P, Gong G F, Yang C J, et al. Simulation and Experimental Study of Energy-Capturing and Wave-Dissipating Floating Breakwater with S Type Blade[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021,55(05):866-874.
- [20]Majcher K, Musiał M, Pakos W, et al. Methods of Protecting Buildings Against Hpm Radiation—a Review of Materials Absorbing the Energy of Electromagnetic Waves[J]. Materials, 2020,13(23):5509.
- [21]Rahimi S A, Baradaran A, Khameneifar F, et al. Decide-Twin: A Framework for Ai-Enabled Digital Twins in Clinical Decision-Making[J]. Ieee Journal of Biomedical and Health Informatics, 2024.
- [22]Sun Y, Xu H, Gu P, et al. Application of Fbg Sensing Technology in Stability Analysis of Geogrid-Reinforced Slope[J]. Sensors, 2017,17(3):597.
- [23]Wenpei W, Yueping Y, Xiewen H U, et al. Effectiveness and Mechanical Characteristics of a Pile-Beam Composite Structure in Blocking Debris Flows[J]. Journal of Geomechanics, 2022,28(6).
- [24]Hong-In P, Takahashi A, Likitlersuang S. Engineering and Environmental Assessment of Soilbag-Based Slope Stabilisation for Sustainable Landslide Mitigation in Mountainous Area[J]. Journal of Environmental Management, 2024,359:120970.

未来的研究应着力构建涵盖“机理-技术-工程”的全链条创新体系,重点突破以下方向:

- 1.深化多物理场耦合机制研究,特别是要突破传统二维模型的局限,发展能够精确刻画滑坡体入水-波浪生成-传播-爬升全过程的三维耦合数值方法;
- 2.研发新型智能监测技术,将分布式光纤传感、InSAR遥感监测与声学多普勒技术深度融合,构建覆盖“滑坡源区-传播路径-岸坡响应”的全天候监测网络;
- 3.开发自适应防护结构体系,基于数字孪生技术实现消浪设施的动态优化,并探索形状记忆合金等智能材料在缓冲结构中的应用;
- 4.完善风险管理决策系统,通过 GIS空间分析、机器学习预测和应急预案生成的有机融合,提升灾害响应的精准性和时效性。

这些研究方向的突破将推动库区滑坡涌浪减灾技术向智能化、精准化和系统化方向发展,为高坝大库的安全运行提供更加可靠的技术保障。后续研究应特别关注复杂环境条件下理论模型与工程实践的适配性验证,以及跨学科创新成果的工程转化应用,最终构建起科学完备的库区滑坡涌浪综合防控技术体系。