

## 大型水库区桥基边坡稳定性与失稳运动特征

王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 李枝强

### Stability and motion characteristics of bridge slope in the large reservoir area

WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, and LI Zhiqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211015>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112-119

#### 二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

#### 三峡库区藕塘滑坡变形特点及复活机制研究

A study of the deformation characteristics and reactivation mechanism of the Outang landslide near the Three Gorges Reservoir of China

黄达, 匡希彬, 罗世林 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 127-135

#### 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil

石爱红, 李国庆, 丁德民, 苑权坤 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 141-151

#### 滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟

Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures

张睿骁, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 148-148

#### 东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211015

王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 等. 大型水库区桥基边坡稳定性与失稳运动特征 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 130-139.  
WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, et al. Stability and motion characteristics of bridge slope in the large reservoir area [J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 130-139.

## 大型水库区桥基边坡稳定性与失稳运动特征

王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 李枝强  
(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 我国西南山区已建成众多大型水库, 库岸边坡在降雨、库水周期性涨落、地震等复杂地质条件作用下易发生滑坡。若公路桥梁基础位于库岸边坡变形或失稳影响范围内, 可能对桥墩产生巨大的侧向荷载, 从而危害基础结构乃至桥梁整体安全, 而针对该问题研究较少。以白鹤滩库区小江特大桥桥基边坡为例, 应用 GeoStudio 分析桥基边坡在库水涨落、降雨、地震联合作用下的稳定性; 针对库水涨落联合降雨工况下的欠稳定边坡, 采用 Tsunami Balls (TB) 数值方法模拟滑坡堆积体失稳下滑冲击桥墩的动力学过程, 分析桥墩受到的动态冲击荷载。研究表明: (1) 库水升降是影响边坡稳定性的主要因素; (2) 施加地震荷载后边坡稳定性系数大幅降低, 而降雨对稳定性系数影响有限; (3) 滑体对桥墩的冲击荷载随时间先增大再减小, 期间会出现 3 次主要荷载峰值, 其中最大冲击荷载 13 890 kN, 出现在滑体最大运动速度之后, 滑体冲击质量最大的时刻。库岸桥基边坡在库水位涨落条件下稳定性明显降低, TB 模拟滑体失稳冲击过程可能造成桥基结构破坏。研究结果可为大型水库边坡和公路桥梁防灾减灾及安全运营提供技术参考。

**关键词:** 水库桥基边坡; 边坡稳定性; 滑坡运动特征; 滑坡冲击力; Tsunami Balls 方法; 桥基安全

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0130-10

## Stability and motion characteristics of bridge slope in the large reservoir area

WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, LI Zhiqiang  
(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** Lots of large reservoirs have been built in the southwest mountainous areas of China, and the slope of reservoir shore is prone to landslides under complex geological conditions such as rainfall, reservoir water periodic fluctuation and earthquake. If the highway bridge foundation is located in the range of bank slope deformation or instability, huge lateral load may be generated on the bridge pier, thus endangering the foundation structure and the overall safety of the bridge. Taking the slope of Xiaojiang Bridge in Baihetan Reservoir as an example, this study applied GeoStudio to analyse the stability of bridge foundation slope under the combined condition of reservoir water fluctuation, rainfall and earthquake. As to the unstable slope under the combined rainfall condition of reservoir water fluctuation, the numerical method of Tsunami Balls (TB) was used to simulate the landslide dynamic process and evaluate the dynamic impact load of the bridge pier. The results show that the slope stability coefficient decreases due to the reservoir water fluctuation, which is the main factor affecting the slope stability.

收稿日期: 2022-11-07; 修订日期: 2023-08-17

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (41907234; 41907237); 云南省交通运输厅科技项目 (云交科教 [2018]12 号)

第一作者: 王佳佳 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害动力学研究。E-mail: [jwang@chd.edu.cn](mailto:jwang@chd.edu.cn)

通讯作者: 肖莉丽 (1985—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事公路岩土工程和地质灾害动力学的研究。E-mail: [llxiao@chd.edu.cn](mailto:llxiao@chd.edu.cn)

After seismic load is applied, the slope stability coefficient decreases sharply, while rainfall has limited influence on the stability coefficient. The impact load of the sliding body on the bridge pier increases first and then decreases with time, and the maximum impact load is 13 890 kN, which appears after the maximum velocity of the sliding body. It is concluded that the stability of the bridge foundation slope on the bank of reservoir is reduced dramatically under the influence of reservoir water fluctuation, and the failure of the bridge foundation structure may be caused by the instability impact process of TB simulated sliding body. This study provides technical information for the disaster prevention and reduction and safe operation of large reservoir slopes and highway bridges.

**Keywords:** bank slope of reservoir; slope stability; landslide motion characteristics; landslide impact force; Tsunami Balls method; bridge foundation safety

近年来,我国在西部山区已修建众多大型水库,库区成为部分公路工程必经的区域。库水的周期性涨落作为库区特有的工程地质条件,成为诱发新生滑坡和古滑坡复活的重要因素<sup>[1-2]</sup>,在叠加降雨、地震等不利因素后会显著增加边坡失稳的风险<sup>[3-6]</sup>。其中,快速失稳运动类型的滑坡产生的危险性最大,破坏力最强,会造成大量的人员伤亡和严重的经济损失。在水库公路的修建过程中,线路往往难以规避未探明的新生滑坡或不稳定斜坡。若公路桥梁桩基位于滑坡失稳运动范围内,则会受到岩土体变形或滑移造成的强烈冲击,结构安全将受到极大影响。因此,对大型水库潜在危险边坡开展稳定性分析及失稳运动特征研究具有重要意义。

影响库区边坡稳定性的因素主要包括集中降雨、库水周期性涨落、地震等。近年来,许多学者利用数值模拟,实地监测等方式对各种影响因素作用下的库岸边坡稳定性进行了广泛研究。Lane 等<sup>[7]</sup>、Berilgen<sup>[8]</sup>和蒋秀玲等<sup>[9]</sup>利用数值方法研究了水位下降对边坡稳定性的影响。梁鑫等<sup>[10]</sup>考虑降雨的影响后联合现场监测数据与数值模拟手段,分析了库水位变动及降雨下的流-固耦合特征及边坡稳定性。Yang 等<sup>[11]</sup>以三峡库区为例,研究降雨与库水位变动导致的边坡稳定性变化。曹千红等<sup>[12]</sup>和 Chen 等<sup>[13]</sup>则进一步考虑地震因素,分别研究了地震荷载联合库水变动与降雨对库区边坡稳定性的影响。

边坡失稳发生滑坡并冲击附近桥梁下部结构很可能会毁坏桥梁。2008 年汶川地震同震滑坡造成都汶公路沿线部分桥梁桥墩被掩埋甚至损毁<sup>[14]</sup>;2016 年四川雅安市境内雅康高速在建的 4 座桥墩(含 8 根墩柱)受到  $6 \times 10^4 \text{ m}^3$  的山体滑坡冲击瞬间损毁,经济损失达 500 万元<sup>[15]</sup>。除此之外,桥墩连接桩基础与上

部结构,在实际使用过程中虽然不像桩基础直接受到地基土的变形影响,但是在边坡发生滑坡过程中,桥墩是直接的受力对象,并且桥墩的存在对滑坡体本身的运动亦产生影响,从而使桥墩及桩基础的受力发生变化。然而,针对此方面的研究则较少<sup>[16-17]</sup>。因此,研究滑坡冲击桥梁下部结构全过程运动与受力特征具有一定的实际价值。

综上所述,库岸边坡稳定性受降雨、库水涨落、地震影响的前期研究虽已比较丰富,但潜在滑坡运动与坡体附近桥墩相互影响的力学特征较复杂,且对桥梁安全至关重要,而与此相关的研究却很少。因此,主要聚焦库岸边坡失稳后冲击桥墩的链式灾害动力学过程,以白鹤滩库区小江特大桥桥基边坡和 14# 桥墩为研究对象,研究边坡在复杂地质条件下的稳定性;分析边坡失稳运动过程和特征,确定桥墩所受时变荷载。旨在为白鹤滩水库和公路工程的安全运营和防灾减灾提供技术支撑。

## 1 研究区概况

### 1.1 白鹤滩水库

白鹤滩水库位于我国西南高山峡谷地区,库区地质条件复杂,受到库水升降、频发地震、集中降雨等因素联合作用,是滑坡灾害的高易发地区(图 1)。水库 2021 年开始蓄水,最大蓄水位 825 m,防洪限制水位 785 m,死水位 765 m,年水位变幅 60 m。库水调度模式如图 2 所示,8 月中旬至 10 月下旬,库水位稳定保持在 825 m,10 月下旬至次年 5 月中旬,库水位逐渐降低至最低水位 770 m,平均降低速率为 0.28 m/d;次年 5 月中旬至次年 8 月中旬期间,库水位逐渐上升至最高水位 825 m,平均上升速率为 0.6 m/d。

研究区气候条件复杂,冬季降雨稀少,气候干燥,

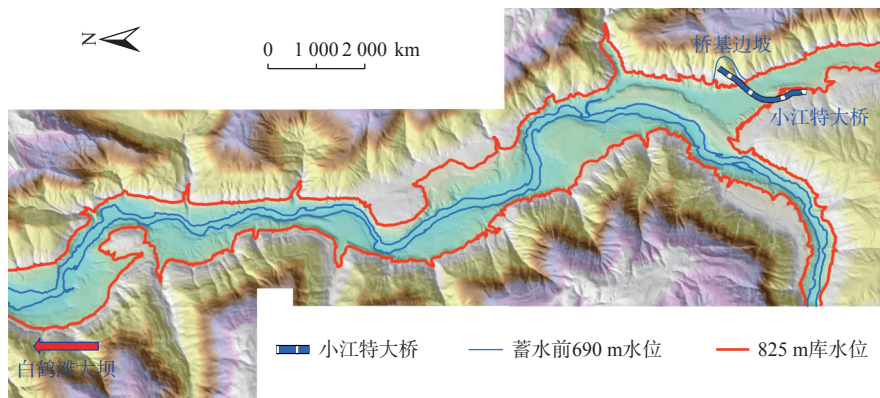


图 1 白鹤滩水库小江特大桥段地形图

Fig. 1 Topographic map of Xiaojiang bridge section of Baihetan Reservoir

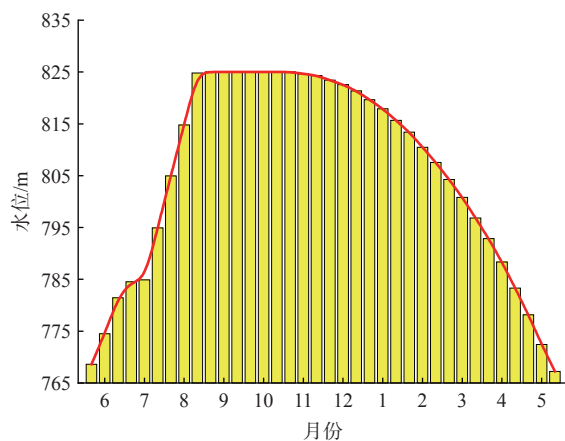


图 2 白鹤滩年度库水位变化情况

Fig. 2 Annual changes of water level in the Baihetan Reservoir

夏季降雨频繁且集中, 全年干湿交替极为明显。据区域所在气象站 1971—2000 年的气象统计, 区域内多年

平均降雨量为 823.2 mm, 历年最大日降雨量 109.9 mm。

研究区内地震频繁, 据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)及《建筑抗震设计规范》(GB5001—2010), 东川区拖布卡镇抗震设防烈度为 9 度, 设计分组为第二组, 设计基本地震加速度 0.30 g, 地震动加速度反应谱特征周期 0.45 s。

### 1.2 桥基边坡

小江特大桥位于白鹤滩库区小江河口附近, 横跨小江河道, 部分桥基位于边坡坡底位置。桥梁全长 1 260 m, 桥墩最高 90 m, 群桩基础。水库蓄水后, 桥墩自地面起超 70 m 高的部分在水面以下, 如图 3。

桥址所在右侧岸坡开挖前呈下陡上缓, 下部坡度为 40°~65°, 上部坡度为 15°~25°。桥基边坡的斜坡地段上部覆盖地层为第四系更新统冲、洪积层, 下伏基岩为寒武系炭质页岩、砂岩。斜坡堆积体中上部厚度



图 3 小江特大桥实体及结构图 (单位: m)

Fig. 3 Entity and structure diagram of Xiaojiang Bridge (unit:m)

略小,下部厚度较大,软弱结构面为岩土界面。边坡间发育大营盘深切冲沟,切割深度约40 m,两侧岸坡地形坡度约 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ,为季节性冲沟,桥体跨越冲沟口部位。

在桥梁建设前的边坡地貌如图4所示。考虑施工安全,该桥基边坡此前已经进行了一定程度的削坡。图中红线内为所研究边坡,紫色虚线为所采用的边坡剖面。图5为简化的边坡剖面与地下水浸润线。水库蓄水后该边坡约 $2/3$ 的坡体在库水位以下。



图4 桥基边坡地貌

Fig. 4 Landform of the bridge foundation slope

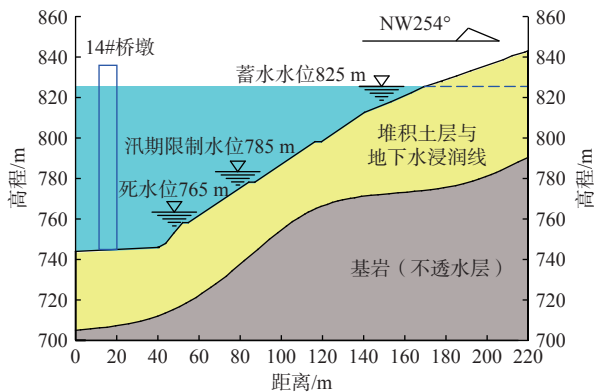


图5 边坡剖面

Fig. 5 Slope profile

## 2 桥基边坡稳定性分析

### 2.1 边坡模型的建立

结合工程地质条件,应用数值模拟软件 GeoStudio 对桥基边坡在多因素(库水、降雨、地震)联合作用下的稳定性系数及其变化规律进行分析。首先使用有限元法进行非饱和渗流分析,再应用 Morgenstern-Price 法<sup>[18]</sup>进行边坡稳定性分析。考虑实际情况,计算时选取 1:1.5 削坡后的桥基边坡建立稳定性计算模型。边坡覆盖层物理力学参数见表1。

考虑研究区工程地质环境,模拟工况主要考虑库

表1 边坡土体参数取值

Table 1 Soil parameters of the slope

重度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )		内聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	渗透系数 /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	饱和体积 含水量 /%
天然	饱和				
19.4	21.7	16.6	37.5	$3.9\times 10^{-3}$	32.0

水周期性运行、降雨和地震的影响,并按照最不利原则进行耦合(表2)。库水周期性涨落和降雨通过边界条件设置进行模拟。依据工况二的计算结果(详见2.3节),库水运行条件下第271天至第275天边坡稳定性系数最低。因此,按最不利原则,以第271天至第275天连续5 d集中降雨作为降雨耦合库水涨落的计算工况,降雨量按照1971—2000年间最大日降雨量取为 $109.9 \text{ mm/d}$ 。研究区域地震峰值加速度的取值为 $0.3 g$ 。

表2 工况选取一览表

Table 2 Schedule of the scenarios

工况	库水位	降雨		地震 加速度/ $g$
		降雨量/( $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )	持续时间	
一	静水位825 m	—	—	—
二	365天库水运行	—	—	—
三	365天库水运行	109.9	第271天至第275天	—
四	365天库水运行	109.9	第271天至第275天	0.3

首先,针对工况一的稳态渗流分析设置825 m静水位边界条件,再以825 m静水位边界条件作为初始条件,设置工况二、工况三、工况四所涉及的瞬态渗流分析边界条件。其中,稳态渗流边界条件以边坡前缘825 m高程以下范围为边界,设置825 m总水头边界条件。瞬态渗流边界条件则调用稳态渗流分析的结果作为初始条件,在边坡前缘825 m高程以下范围设置变水头边界,边坡右边界则设置825 m定水头边界。水头变化和时间的关系由1.1节中水位调度图线性插值确定,如图6所示。

### 2.2 不同工况下滑移面的变化

规定滑坡面剪入口和剪出口范围,使用软件自动搜索的方法获取最可能的滑坡面。工况一的最终滑坡面如图7所示。由于不考虑水面变化,土体水压属于静水水压,压力沿深度均匀变化。

由于工况二、工况三、工况四中最低稳定性系数和最危险滑坡面随时间不断变化。计算结果显示,边坡稳定性系数最低点出现在第275天,对应的最不利滑坡面及土体水压分布分别如图8—10所示,蓝色虚线为浸润线。图8、图9分别显示工况二和工况三的

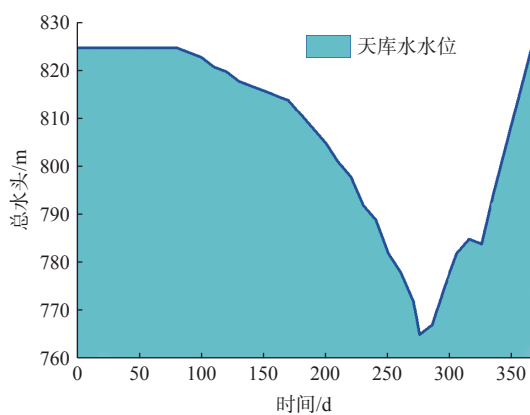


图 6 库水水头边界变化图

Fig. 6 Variation of reservoir water head boundary

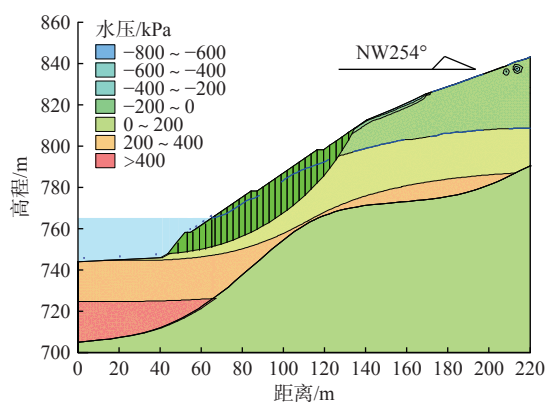


图 9 工况三最危险滑移面

Fig. 9 The most unfavorable slip surface in scenario 3

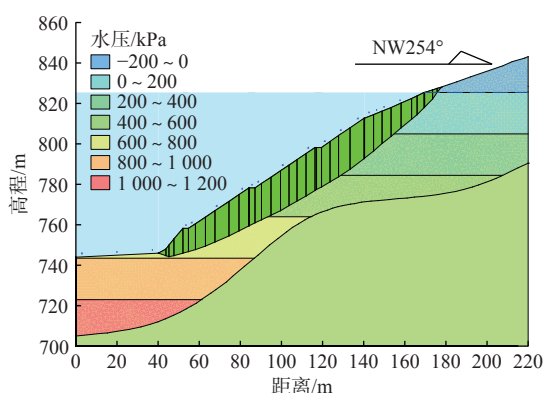


图 7 工况一最不利滑移面及土层孔隙水压

Fig. 7 The most unfavorable slip surface and soil pore water pressure in scenario 1

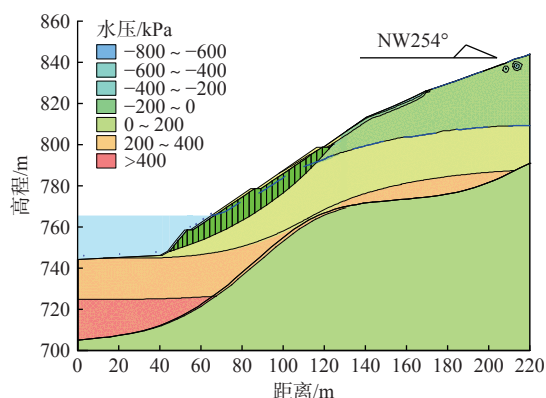


图 10 工况四最危险滑移面

Fig. 10 The most unfavorable slip surface in scenario 4

最危险滑移面较深, 图 10 显示在地震作用下最危险滑移面深度较浅, 失稳后会形成浅层滑动。

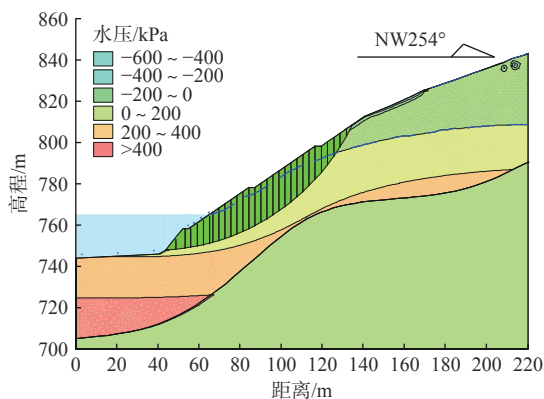


图 8 工况二最危险滑移面

Fig. 8 The most unfavorable slip surface in scenario 2

### 2.3 不同工况下边坡稳定性系数

边坡在 825 m 静水位工况下(工况一)最低稳定性系数为 1.685, 边坡处于安全状态。工况二、工况三、

工况四最危险滑移面对应的边坡稳定性系数在 365 d 内随时间变化如图 11 所示。

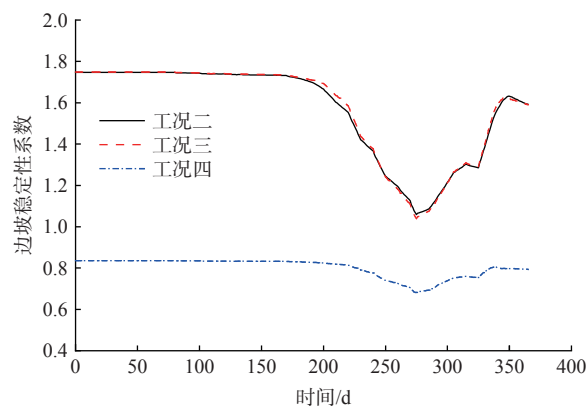


图 11 工况二、工况三、工况四条件下边坡稳定系数变化曲线图  
Fig. 11 Slope stability coefficient changes under all scenarios

据图 11 可知, 工况二、工况三、工况四的稳定性系数变化规律基本一致。边坡稳定性系数初始值为 1.746(工况四为 0.835), 在库水位变化前基本保持不变, 随着库水位升降, 稳定性系数亦同步发生变化, 并

在库水位最低时, 稳定性系数均达到其最小值。各工况下的最小边坡稳定性系数如表 3 所示。

表 3 各工况下最低稳定性系数  
Table 3 Minimum stability coefficient under each scenario

工况	工况一	工况二	工况三	工况四
最低稳定系数	1.656	1.061	1.039	0.683

在工况二中, 随着库水位降低, 边坡稳定性系数由 1.746(稳定状态)降低至 1.061(临界状态), 降幅达 39%, 远低于工况一的最低稳定性系数。随着库水位升高, 稳定性系数亦开始增大, 并最终达到 1.593, 低于初始值 1.746, 由此可知, 稳定性系数对库水位涨落极为敏感, 尤其是库水下降时, 边坡稳定性会大幅降低, 结论与前人研究成果一致<sup>[4]</sup>。工况三中的稳定性系数变化与工况二基本一致, 最低稳定性系数略低于工况二, 可见降雨对该边坡稳定性系数影响有限<sup>[9]</sup>。在工况四中, 由于存在地震加速度, 稳定性系数一直低于 1.0, 且远低于工况二、工况三中的稳定性系数初始值, 边坡全程处于不稳定状态。

由上述分析结果可知, 该边坡在地震作用下极有可能发生滑坡, 而在库水运行和降雨的耦合作用下, 其稳定性系数维持在 1 左右, 存在发生变形或失稳破坏的可能, 边坡附近的桥梁结构安全将受到威胁。

### 3 边坡失稳动力学模拟

#### 3.1 滑体动力学分析模型

Tsunami Balls(TB)是由美国地球物理学家 S. N. Ward 研发的针对流体及类流体运动分析的二维无网格的数值模拟程序。

TB 假定滑坡体由很多有质量的大小相同的球体(Balls)组成, 满足变深度平均的连续方程和动量方程, 每个位置的厚度用该处小球的体积密度来度量, 并考虑它们之间的相互作用力和摩擦力。外力作用下小球获得运动加速度, 根据牛顿运动定理得到其相应时刻的速度和位移, 通过确定每一个小球在每一时刻的位置和状态, 模拟出滑体的运动过程。在 TB 中, 滑体的运动阻力分为两种, 即基底摩擦力和运动摩擦力, 分别以加速度  $a_b$  和  $a_d$  表示, 计算公式如下:

$$a_b = -\mu_b g \quad (1)$$

$$a_d = -\mu_d v^2 / H \quad (2)$$

式中:  $\mu_b$ ——基底摩擦系数, 当滑体运动速度降到临界值时,  $\mu_b$  会由较小的动态值转化为较大的

静态值, 这种转变与运动休止角有关;

$\mu_d$ ——运动摩擦系数;

$g$ ——重力加速度;

$v$ ——滑体运动速度;

$H$ ——滑体厚度。

上式中,  $\mu_b$  和  $\mu_d$  受到多种因素控制, 它们都可以是时间和空间的函数。TB 理论认为, 滑体的运动过程存在一种状态转化, 即滑体从固体性质(起滑阶段)转化为类流体性质(高速运动阶段)再转化为固体性质(停止阶段), 这其中, 起滑和停止这种具有固体性质的过程主要受基底摩擦系数  $\mu_b$  支配, 而高速运动阶段基底摩擦较小且稳定, 运动摩擦较大, 因此该阶段主要受运动摩擦系数  $\mu_d$  支配。

在滑体起滑和停止过程中,  $\mu_b$  会有一个性质的突变, 即由静态摩擦转化为动态摩擦或者由动态摩擦转化为静态摩擦, 尤其是当滑体接近停止时, 滑体运动速度接近临界值, 坡度接近运动休止角,  $\mu_b$  会由较小的动态值转变为较大的静态值。因此, 当  $\mu_b$  与  $\mu_d$  确定后, 程序中只需设置速度临界值和运动休止角即可控制滑体运动的停止, 无需其他的边界条件。Tsunami Balls 曾被应用于 1958 年 Lituya 湾滑坡及涌浪, 瓦伊昂滑坡等失稳后的运动模拟<sup>[20-22]</sup>。Ward 等<sup>[23]</sup>、肖莉丽<sup>[24]</sup>对 Tsunami Balls 原理进行了详细的阐述。

由于工况四中的地震因素属于极偶然状况, 发生概率相对较低, 因此采用工况三的最危险滑移面(图 9)进行失稳运动分析。基于稳定性计算结果及勘测数据得到边坡坡面、滑移面的坐标数据以及桥梁右线 14#桥墩相对位置。其中, 小江桥 14#桥墩为双肢薄壁墩, 考虑到在滑坡工况条件下, 桥墩的形状对桥墩所受到的滑坡冲击影响较小, 故在 TB 数值模拟中, 为减小建模难度, 将桥墩简化为规则柱体, 其尺寸结构如图 12 所示。其中图 12(a)为桥梁 14#桥墩实际结构尺寸图, 图 12(b)为 TB 模拟中的桥墩简化结构尺寸图。

#### 3.2 滑体运动过程

Tsunami Balls 模拟程序初始设置基底摩擦系数为 0.1, 临界速度为 0.2 m/s, 运动休止角 20°。应用程序对边坡进行时长为 1 min 的失稳运动模拟。

Tsunami Balls 程序中的边坡和桥墩初始模型如图 13 所示。

模拟结果表明, 在重力和土体间摩擦力共同作用下, 失稳运动主要发生在前 10 秒。随后, 破坏体堆积形态和冲击力大小基本趋于稳定。因此, 针对边坡失稳发生后的前 10 秒以每秒为时间间隔进行研究。

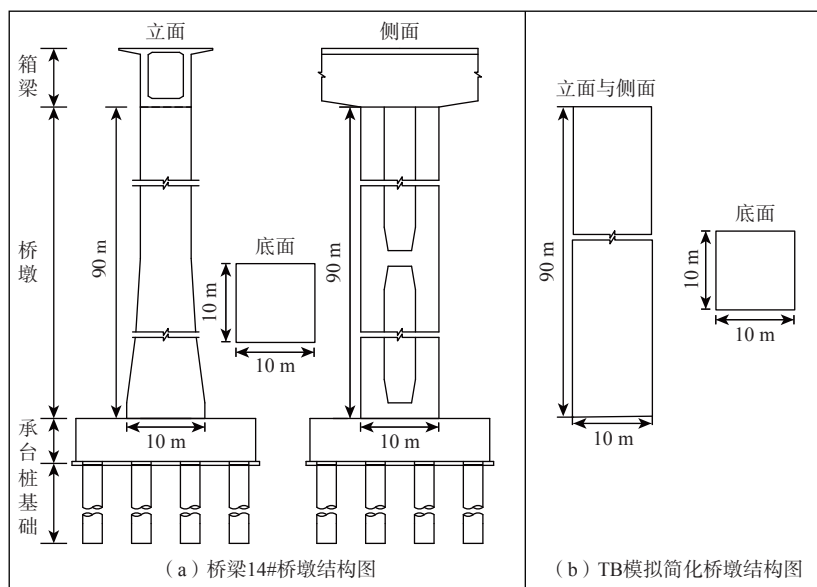


图 12 桥墩实际结构尺寸图与 TB 模拟中的简化模型

Fig. 12 Actual structural dimension diagram of pier and simplified model in TB simulation

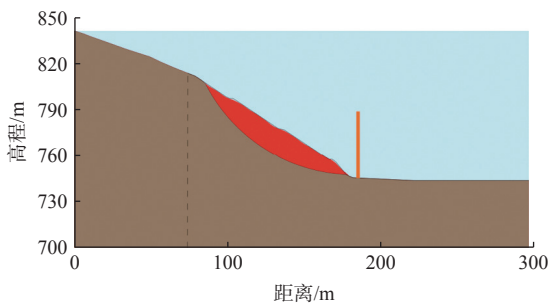


图 13 边坡和桥墩初始模型

Fig. 13 Initial model of the slope and pier

失稳运动前 10 秒内滑坡运动过程中破坏体和第 15 秒、第 20 秒、第 25 秒、第 30 秒、第 35 秒滑体运动停止时的位置形态如图 14 所示。

由模拟结果可知,在第 0 秒至第 2 秒内,滑体上部首先发生失稳滑动,对下部土体造成挤压,致使下部土体产生变形和轻微滑动,滑体整体开始向下滑动,形成推移式滑坡,平均速度约为 6.4 m/s。此期间滑体还未与桥墩接触。在第 3 秒至第 5 秒内,滑体下层土体受上层土体挤压加速运动,并开始对桥梁承台和桥墩造成冲击。运动 10 s 后,大部分滑体速度急剧减小,趋于停止。第 35 秒以后,滑体运动停止,桥墩被滑体掩埋,掩埋深度约 18 m。

### 3.3 滑体冲击荷载

滑体运动的速度受到滑移面形状、剪切带摩擦力、滑体整体高度等多个因素的影响。由 TB 方法得到的滑体运动的平均速度和对桥墩的冲击荷载随时间变化如图 15 所示。需要注意,此处所呈现的冲击

荷载仅为滑体运动对桥墩冲击所致,不包含滑体静止后对桥墩产生的静压力。

根据图 15 计算结果,在 0 至第 2 秒滑体还未与桥墩接触,没有对其产生冲击荷载。在第 3 秒至第 5 秒,滑体整体向下运动,对桥梁承台和桥墩造成巨大冲击。此期间,在重力作用下,滑体下滑速度持续增加,桥墩所受的冲击荷载也越来越大。约在 4.6 s 时刻,滑体速度接近最大,冲击荷载达到第 1 个峰值 10 335 kN,随后因滑体速度快速降低,冲击荷载略微下降。在 5.3 s 时刻,滑体上部土体到达坡底,冲击桥墩的滑体质量达到最大,冲击荷载达到第 2 个峰值也即最大值 13 890 kN,高于第一次峰值约 34%。约 5.3 s 之后,最先发生失稳的上部滑体停止运动,冲击荷载骤减。然而,下部土体再次被挤压从而继续向前滑动对桥基造成冲击,冲击荷载再次上升达到第 3 个峰值。最后,滑体逐渐停止运动,冲击荷载也逐渐趋向于零,由于滑体局部还在不时发生滑动,致使冲击荷载数值上下波动。此过程中出现冲击荷载小于零的情况,这是因为桥墩前堆积土层厚度较大,产生了主动土压力。

滑坡的冲击与桥墩可能受到船舶的撞击相似,由模拟结果可知,桥墩可能受到的滑坡冲击荷载高达 13 890 kN,据《内河通航标准》(GB 50139—2014)<sup>[25]</sup>,小江特大桥所处航道为一级航道,在未来会实现货运和客运通航,另据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)<sup>[26]</sup>,对于一级航道,即船舶吨级为 3 000 t 时,内河船舶撞击作用标准值为横向撞击力 1 400 kN,



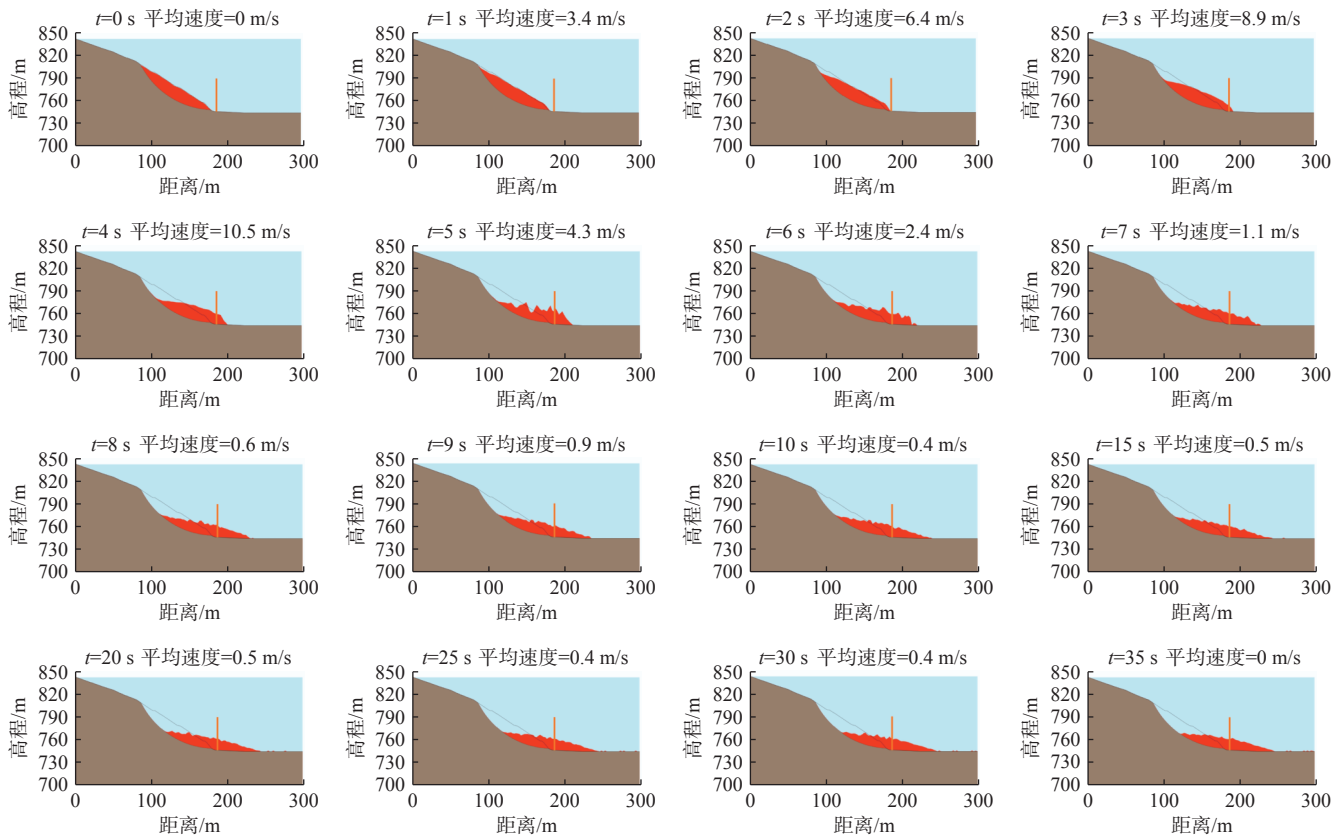


图 14 边坡失稳各时刻运动形态

Fig. 14 Movement pattern of slope failure at each moment

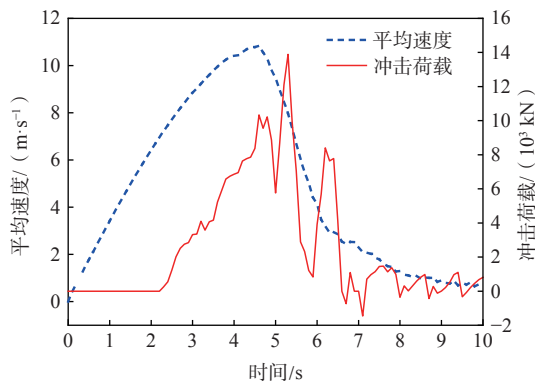


图 15 滑体失稳运动的平均速度和桥墩所受的冲击荷载

Fig. 15 The average velocity and impact force of the sliding mass on the pier

纵向撞击力 1 100 kN, 因此, 滑坡冲击荷载可能会对桥墩产生较大的破坏。

桥墩受到滑体冲击所产生的荷载, 不仅对桥墩本身产生影响, 亦会通过承台传递给下部桩基础, 造成桩基础的破坏。同时, 桥墩上部会产生位移, 危及桥梁上部结构安全。因此, 桥墩受力所产生的影响是多方面的, 需综合分析其对桥梁其他部分的影响以评价桥梁的整体安全性。

## 4 结论

桥基边坡失稳运动会危及桥梁安全。以白鹤滩库区内小江特大桥及其所在边坡工程为依托, 结合库区工程地质背景, 分析边坡稳定性变化, 研究边坡失稳运动特征及其对桥墩的冲击作用, 得到以下结论:

(1) 库水位下降会导致边坡稳定性显著降低, 是由于土体内水位下降迟于库水位, 从而产生向外的渗透压, 降低土体间的摩擦系数, 且持续降低的水位如同对边坡坡脚卸载, 减小了边坡抗滑力; 而库水位上升会产生向土体内的渗透压, 并且会对边坡坡脚进行加载, 从而增加边坡稳定性。

(2) 依据工况二与工况三的稳定分析结果, 库水位涨落对库岸边坡稳定性具有较大影响; 降雨对该处边坡稳定性的影响有限; 库水升降联合降雨条件下会使边坡处于临界状态, 应给予关注; 据工况四的稳定分析结果, 施加 0.3 g 地震加速度条件会使边坡直接处于失稳状态。

(3) 针对库水升降联合降雨条件下的边坡欠稳定状况, 应用 Tsunami Balls 程序定量模拟滑体失稳并冲击桥墩的运动过程。结果显示, 滑体运动主要集中在

前 10 秒, 冲击荷载先均匀增大后以震荡形式快速减小, 期间主要存在 3 次荷载峰值。

(4) 在冲击荷载的 3 次主要峰值中, 第一次峰值 10 335 kN 出现在滑体运动速度最大时, 第二次峰值也即冲击荷载最大值 13 890 kN 出现在上部滑体造成的质量突增时刻。因此, 由滑体质量突增造成的冲击荷载突变可能更为严重, 在实际灾害预防中应给予更多关注。

#### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 谭淋耘, 黄润秋, 裴向军. 库水位下降诱发的特大型顺层岩质滑坡变形特征与诱发机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 302 - 314. [ TAN Linyun, HUANG Runqiu, PEI Xiangjun. Deformation characteristics and inducing mechanisms of a super-large bedding rock landslide triggered by reservoir water level decline in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 302 - 314. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 周孝鑫, 谭钦文, 林志果, 等. 京广铁路 K1219 路基土质边坡深层滑移失稳机制与整治对策 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 85 - 94. [ ZHOU Xiaoxin, TAN Qinwen, LIN Zhiguo, et al. Deep sliding instability mechanism and remediation measures: The subgrade soil slope along the Jingguang Railway at K1219[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 85 - 94. ]
- [ 3 ] 周洪福, 冯治国, 石胜伟, 等. 川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 112 - 119. [ ZHOU Hongfu, FENG Zhiguo, SHI Shengwei, et al. Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 112 - 119. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 尚敏, 廖芬, 马锐, 等. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性量化分析研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 742 - 750. [ SHANG Min, LIAO Fen, MA Rui, et al. Quantitative correlation analysis on deformation of baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 742 - 750. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 刘洋, 裴向军, 罗璟, 等. 地震与强降雨条件下云南鲁甸王家坡震裂山体稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 23 - 33. [ LIU Yang, PEI Xiangjun, LUO Jing, et al. Analysis on the stability of seismic-slope in Wangjiapo under earthquake and strong raining[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 23 - 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 严绍军, 唐辉明, 项伟. 降雨对滑坡稳定性影响过程分析 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 33 - 36. [ YAN Shaojun, TANG Huiming, XIANG Wei. Effect of rainfall on the stability of landslides[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 33 - 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 443 - 450.
- [ 8 ] BERILGEN M M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(2): 81 - 91.
- [ 9 ] 蒋秀玲, 张常亮. 三峡水库水位变动下的库岸滑坡稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 38 - 42. [ JIANG Xiuling, ZHANG Changliang. Stability assessment for the landslide undergoing the effects of water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 38 - 42. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 梁鑫, 殷坤龙, 陈丽霞, 等. 库水位波动及降雨作用下巫峡干井子滑坡流-固耦合特征及稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 30 - 40. [ LIANG Xin, YIN Kunlong, CHEN Lixia, et al. Flow-solid coupling characteristics and stability analysis of Ganjingzi Landslide in the Wu Gorge under reservoir water level fluctuation and rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 30 - 40. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] YANG Beibei, YIN Kunlong, XIAO Ting, et al. Annual variation of landslide stability under the effect of water level fluctuation and rainfall in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16): 564.
- [ 12 ] 曹千红, 伍岳, 李耀, 等. 基于拟静力法分析库水变化条件下地震荷载对某边坡稳定性影响研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 15 - 18. [ CAO Qianhong, WU Yue, LI Yao, et al. Study of stability of bank slope under earthquake and reservoir water level fluctuation by pseudo-static method[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012,

- 34(2): 15 – 18. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] CHEN Lixia, MEI Le, ZENG Bin, et al. Failure probability assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall: a case study in Yadong County, Tibet, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16531.
- [14] 何思明, 庄卫林, 张雄, 等. 都汶公路彻底关大桥桥墩抗滚石冲击防护研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3421-3427. [ HE Siming, ZHUANG Weilin, ZHANG Xiong, et al. Research on rockfall impact prevention of chediguan bridge pier, duwhen road[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3421-3427. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 刘波, 蒋麟. 山体滑坡冲毁 8 根桥墩, 在建雅康高速或微调线路 [N]. 成都商报, 2016. [ LIU Bo, JIANG Lin. The landslide swept away eight bridge piers, and the Yakang Expressway or fine-tuning line is under construction[N]. Chengdu Commercial Daily, 2016. (in Chinese) ]
- [16] 王占彬, 张卫杰, 张健, 等. 基于并行 SPH 方法的地震滑坡对桥桩的冲击作用 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(7): 54 – 65. [ WANG Zhanbin, ZHANG Weijie, ZHANG Jian, et al. Impact of earthquake-induced landslide on bridge pile based on parallelized SPH method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(7): 54 – 65. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 晏长根, 李为, 赵珍祥, 等. 郑家湾滑坡体蠕变对上跨桥梁的影响分析 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 416 – 423. [ YAN Changgen, LI Wei, ZHAO Zhenxiang, et al. Impact analysis of creep movement of zhengjiawan landslide to bridge across[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 416 – 423. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] PRICE V E, MORGENSTERN N R. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. *Géotechnique*, 1968, 18(3): 393 – 394.
- [19] 曾润忠, 谢典, 祝俊华, 等. 水位升降与降雨耦合作用下库岸边坡稳定性分析 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 118 – 126. [ ZENG Runzhong, XIE Dian, ZHU Junhua, et al. Stability analysis of reservoir bank slope under the coupling action of water level fluctuation and rainfall[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2022, 41(5): 118 – 126. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] WARD S N, DAY S. Particulate kinematic simulations of debris avalanches: interpretation of deposits and landslide seismic signals of Mount Saint Helens, 1980 May 18[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(2): 991 – 1004.
- [21] WARD S N, DAY S. The 1958 lituya bay landslide and tsunami-a tsunami ball approach[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2010, 4(4): 285 – 319.
- [22] STEVE W N, SIMON D. The 1963 Landslide and Flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation[J]. *Italian Journal of Geosciences*, 2011(1): 16 – 26.
- [23] WARD S N, DAY S. Tsunami balls: a granular approach to tsunami runup and inundation[J]. *Communications In Computational Physics*, 2008, 3(1): 222 – 249.
- [24] 肖莉丽. 库岸滑坡涌浪数值模拟研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. [ XIAO Lili. Study on numerical simulation of landslide surge in reservoir bank[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Navigation standard of inland waterway: GB 50139—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese) ]
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. [ Ministry of Transport of the People's Republic of China. General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese) ]

编辑: 王支农