

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.077



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



库水位变化和降雨联合作用下黑水河岸坡稳定可靠度分析

仇文岗¹, 冉博¹, 顾鑫¹, 张飞², 费建波³, 王培清^{4a}, 陈亮^{4b}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024; 3. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室(深圳大学), 广东 深圳 518060; 4. 西藏农牧学院 a. 水利土木工程学院; b. 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏 林芝 860000)

摘要: 库水位变化和降雨联合作用下的边坡稳定分析通常采用确定性分析方法, 然而岩土体参数具有天然的空间变异性, 确定性分析方法无法准确评估边坡的稳定性。以白鹤滩库区黑水河岸坡为例, 基于实测降雨和库水位数据, 分析了 1 a 周期内库水位变化和降雨联合作用下的边坡稳定性。通过确定性分析确定 3 种最不利工况。在此基础上, 进一步考虑有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 φ' 、饱和渗透系数 k_s 的空间变异性, 利用随机有限差分法(RFDM)对比平稳随机场和非平稳随机场对边坡可靠度分析结果的影响规律。结果表明, 相较于降雨入渗, 库水位涨落对边坡稳定性起关键性作用, 最小安全系数出现在库水位快速下降期, 且降雨和库水位的联合作用显著增大了边坡的失效概率和滑动体积。此外, 在对边坡稳定性开展随机分析时, 应当考虑岩土体参数随深度变化的特性, 否则将低估边坡的稳定性。

关键词: 边坡稳定性; 边坡可靠度; 可靠度分析; 非平稳随机场

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)06-0043-09

Reliability analysis of bank slope stability in the Heishui River under combined effects of reservoir water level changes and rainfall

ZHANG Wengang¹, RAN Bo¹, GU Xin¹, ZHANG Fei², FEI Jianbo³,
WANG Peiqing^{4a}, CHEN Liang^{4b}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P. R. China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China; 4a. College of Water Conservancy and Civil Engineering; 4b. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Xizang, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Xizang, P. R. China)

收稿日期: 2024-06-05

基金项目: 重庆市教委科技攻关项目(HZ2021001); 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-01); 长江重庆航道工程局科技项目(H20230330)

作者简介: 仇文岗(1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程可靠度评价研究, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。

顾鑫(通信作者), 男, 博士, E-mail: guxin@cqu.edu.cn。

Received: 2024-06-05

Foundation items: Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (No. HZ2021001); Transport Science and Technology Program in Sichuan Province (No. 2018-ZL-01); Science and Technology Program of Chongqing Waterway Engineering Bureau of Yangtze River (No. H20230330)

Author brief: ZHANG Wengang (1983-), PhD, professor, main research interest: reliability analysis in geotechnical engineering, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

GU Xin (corresponding author), PhD, E-mail: guxin@cqu.edu.cn.

Abstract: Current slope stability analysis under the combined effects of reservoir water level and rainfall is estimated commonly via the deterministic analysis methods. However, these methods cannot accurately evaluate the slope stability due to the inherent spatial variability of geotechnical parameters. Therefore, in this study, the slope stability influenced by reservoir water level and rainfall is analyzed based on the monitored data during an annual cycle of rainfall and reservoir water level, taking the bank slope of Heishui River in Baihetan reservoir area as an example. Firstly, the three most unfavorable cases are determined through deterministic analysis. Accordingly, the influences of stationary and non-stationary random fields on the results of slope reliability analysis are compared using the stochastic finite difference method (RFDm), considering the spatial variability of effective cohesion c' , effective friction angle φ' and saturated permeability coefficient k_s , respectively. Results show that, compared with the rainfall infiltration, the reservoir water level fluctuation plays a crucial role in slope stability, and the minimum safety factor occurs during the rapid drawdown. Meanwhile, the combined effects of rainfall and reservoir water level would significantly increase the slope failure probability and sliding volume. In addition, the depth-dependent characteristics of geotechnical parameters require to be considered when conducting stochastic analyses of slope stability, otherwise the slope stability would be underestimated.

Keywords: slope stability; slope reliability; reliability analysis; non-stationary random fields

近年来,中国西南地区兴建了许多大型水电站,如锦屏 I 级、白鹤滩等水电站,水电站的建设与运营在带来巨大经济效益的同时,也会诱发滑坡等地质灾害。白鹤滩水电站是中国第二大水电站,位于金沙江下游云南省与四川省的交界处。自 2021 年 4 月初次蓄水后,在库水位变化、强降雨等外部激励作用下,库区发生了多次滑坡,对当地人民生命财产安全造成了严重威胁。因此,评价白鹤滩水电站库岸边坡的稳定性具有重要意义。

目前,围绕白鹤滩库区岸坡稳定性的相关研究已取得一定成果。Li 等^[1]采用离散元数值模拟与微震监测相结合的方法,探究了白鹤滩水电站左岸边坡开挖卸荷后的稳定性。钱波等^[2]基于微震监测数据对 FLAC3D 进行二次开发,分析了白鹤滩水电站左岸边坡岩体微震损伤状态下的变形特征。Xu 等^[3]结合监测资料建立了复杂的有限元渗流模型,研究了白鹤滩水电站初期蓄水过程中水库边坡变形的规律和机理。Chen 等^[4]基于现场调查、钻孔勘探、变形监测以及数值分析等手段,研究了白鹤滩库区王家山滑坡的蓄水响应机制和破坏模式。

现有针对白鹤滩库区边坡的研究鲜有涉及多种外部因素作用下的边坡稳定性分析,多数研究主要集中在岸坡微震损伤、蓄水等单一因素作用下岸坡稳定的确定性分析。但由于岩土体物理参数具有较大的不均匀性和空间变异性^[5],采用可靠度分析方法有助于更准确地评估边坡的失效风险与后果。Zhang 等^[6]基于随机变量法研究了降雨和库水位变化共同作用下八字门滑坡的概率稳定性,尚未考虑岩土体参数的空间变异性、土体参数性质非平稳特性的影响。薛阳等^[5]建立了饱和渗透系数的非

平稳随机场模型来分析库水位升降条件下白水河滑坡的渗流场和变形特征,但尚未探究降雨以及上述两种外力共同作用的影响。此外,当前多数研究主要采用失效概率评估边坡稳定性^[7-8],涉及滑面分布、滑动体积等多种致灾后果评估指标的研究有待深入探讨。

笔者以白鹤滩库区的黑水河岸坡为研究对象,通过地质分析,结合现场勘查数据,运用 FLAC3D 软件模拟该边坡在库水位和降雨共同作用下的稳定性,分析边坡渗流场的变化规律以及变形破坏机理;考虑边坡饱和渗透系数和抗剪强度参数空间变异性的影响,基于随机场理论对该边坡的失效概率和滑动体积进行评估,并对比探究岩土体参数随深度变化的特性对边坡稳定性评估结果的影响,旨在为应急救灾部门制定合理的治灾方案提供参考。

1 非饱和边坡渗流稳定性分析原理

1.1 流固耦合计算原理

在进行饱和、非饱和渗流计算时,FLAC3D 软件均采用达西定律^[9],其计算公式为

$$q_i = -k_{ii}k(s)(p - \rho_i x_i g_i) \quad (1)$$

式中: q_i 为流量; k_{ii} 为渗透系数张量; $k(s)$ 为渗透系数; s 为饱和度; p 为孔隙水压力; ρ_i 为流体密度; g_i 为重力加速度; x_i 为笛卡尔坐标系分量。

在 FLAC3D 中,描述孔隙压力、饱和度、体积应变和含水量关系的方程式为

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2)$$

式中: M 为比奥模量; n 为孔隙率; ξ 为单位体积岩土体孔隙内流体体积因流体在土体内扩散而引起的

变化量; t 为时间。

由于FLAC3D软件内置的基本渗流模块存在一定的局限性,即负孔压区的饱和度在计算过程中始终为1,渗透系数始终为饱和渗透系数。因此,基于Fish语言对FLAC3D完成非饱和渗流二次开发,建立更加准确的基质吸力与饱和度的关系以及饱和度与渗透系数的关系。采用 van Genuchten-Mualem(VGM)^[10]模型来描述饱和度与基质吸力之间的关系。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + (\psi/a)^n\right]^m} \quad (3)$$

式中: S_e 为有效饱和度; θ_s 和 θ_r 分别为饱和含水量和残余含水量; ψ 为基质吸力; a 、 n 和 m 为曲线的拟合参数。对应的渗透系数计算式为

$$k = k_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m\right]^2 \quad (4)$$

式中: k_s 为饱和渗透系数。

确定岩土体的渗透系数后,可以进行渗流分析,研究非饱和边坡内孔隙水压力和体积分水量的分布情况。根据 Bishop 有效应力原理^[11],非饱和土体的抗剪强度公式为

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (5)$$

式中: τ_f 为抗剪强度; c' 和 φ' 分别为有效黏聚力和有效内摩擦角; σ 为总法向应力; u_a 、 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力; χ 为非负常量。

1.2 平稳随机场的模拟

Vanmarck^[12]提出了随机场理论,用于模拟岩土体参数的空间变异性,此时将土体参数随机场离散为一系列随机变量。目前已经发展了多种随机场离散方法,其中,由于概念简单且容易编程实现,协方差矩阵分解法^[13]被用来离散土体参数随机场。笔者主要考虑 c' 、 φ' 和 k_s 的空间变异性,假定各参数均服从对数正态分布,避免负参数值。

采用二维指数型自相关函数(ACF)^[14]模拟平稳随机场。

$$\rho(\tau_x, \tau_y) = \exp \left[-2 \sqrt{\left(\frac{\tau_x}{\theta_h}\right)^2 + \left(\frac{\tau_y}{\theta_v}\right)^2} \right] \quad (6)$$

式中: τ_x 和 τ_y 分别为空间中不同位置两点之间的水平和垂直距离; θ_h 和 θ_v 分别为水平和垂直波动范围。

假设一个区域被离散为 n_e 个随机场单元网格,每个单元网格的中心点坐标为 (x_i, y_i) ,其中 $i=1, 2, \dots, n_e$ 。根据自相关函数和单元网格中心点坐标,可建立自相关矩阵

$$C_{n_e \times n_e} = \begin{bmatrix} 1 & \rho(\tau_{x_{12}}, \tau_{y_{12}}) & \cdots & \rho(\tau_{x_{1n_e}}, \tau_{y_{1n_e}}) \\ \rho(\tau_{x_{21}}, \tau_{y_{21}}) & 1 & \cdots & \rho(\tau_{x_{2n_e}}, \tau_{y_{2n_e}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\tau_{x_{n_1}}, \tau_{y_{n_1}}) & \rho(\tau_{x_{n_2}}, \tau_{y_{n_2}}) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

考虑到岩土体参数中 c' 和 φ' 存在一定相关性,互相关系数矩阵可以被定义为

$$R_{m \times m} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{c', \varphi'} \\ \rho_{\varphi', c'} & 1 \end{bmatrix}, \rho_{c', \varphi'} = \rho_{\varphi', c'} \quad (8)$$

对 C 和 R 进行乔列斯基分解,可以分别得到维度为 $n_e \times n_e$ 的下三角矩阵 L_1 以及维度为 $m \times m$ 的下三角矩阵 L_2 。在此基础上,一个相关标准高斯随机场可被定义为

$$X_i^G = L_1 \xi_i L_2^T, i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中:上标G为标准高斯随机场; i 为标准高斯随机场的实现次数; ξ_i 为样本矩阵。

随后,基于等概率变换方法可以得到原始空间中 c' 、 φ' 和 k_s 的非高斯参数随机场

$$X_i^{NG} = F^{-1} \{ \Phi(X_i^G) \}, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中:上标NG为非高斯随机场; $F^{-1}(\cdot)$ 为非高斯分布边缘累积分布的逆函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布累积分布函数。

1.3 非平稳随机场的模拟

大量现场试验数据表明,岩土体参数呈非平稳分布特征^[15]。因此,为了在边坡可靠度分析中考虑岩土体参数随深度变化的特性,需建立非平稳随机场。选用的二维非平稳随机场模型为

$$X_i(z) = X_i^{NG} \frac{\mu_0 + kz}{\mu_0} \quad (11)$$

式中: μ_0 为岩土体参数的均值; k 为岩土体参数沿埋深方向的变化梯度; z 为地面以下土体深度。因此,式(11)所示非平稳随机场模型中,岩土体参数的均值和标准差分别为

$$\mu_{X_i} = \mu_0 + kz \quad (12)$$

$$\sigma_{X_i} = \beta(\mu_0 + kz) \quad (13)$$

式中: β 为岩土体参数的变异系数。

1.4 失效概率的计算

基于随机有限差分法(RFDM)对边坡进行概率稳定性分析。在FLAC3D中采用强度折减法计算安全系数,然后直接采用蒙特卡罗模拟(MCS)计算 N 个样本下边坡的失效概率。

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(F_s < 1) \quad (14)$$

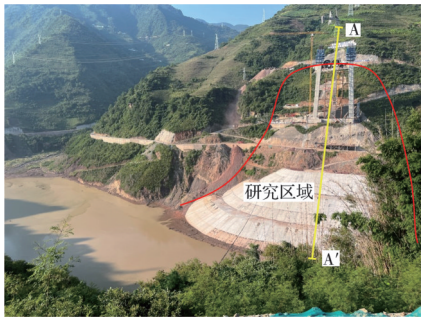
式中: N 为MCS的样本数; $I(\cdot)$ 为判断边坡是否破坏的

指示函数。对于给定的随机样本,当边坡安全系数 $F_s<1$ 时, $I(\cdot)$ 等于1,否则等于0。一般情况下, N 值需要满足 $\beta_{Pf}<0.1$,即边坡的失效概率收敛^[16]。

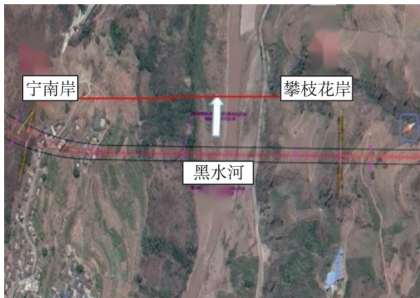
2 黑水河岸坡的基本概况

2.1 地质条件

黑水河岸坡地处四川省凉山州宁南县,距宁南县城约5.0 km,位于黑水河右岸。拟建的黑水河大桥呈直线斜跨黑水河,分别连接宁南岸和攀枝花岸(图1)。黑水河所在流域属于白鹤滩水电站库区,存在库水位周期性涨落的现象。岸坡前缘高出江面约110 m,斜坡上部为相对较缓地形,下部为陡坡,坡度 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,坡脚基岩陡坎,坡度可达 60° 以上。坡体覆盖层为冲洪积卵石层,堆积层厚度相对较小,最厚处大于20 m,平均地形坡度 42° ,坡脚处基岩裸露,形成陡坡,沿黑水河呈条带状分布。



(a) 黑水河大桥位置



(b) 黑水河两岸情况

图1 白鹤滩库区黑水河岸坡的地理位置

Fig. 1 Geographic location of the bank slope of Heishui River in Baihetan reservoir area

2.2 水文条件

白鹤滩水库建成后,该区域正常蓄水位为825 m,最低水位为768 m,库水位涨落幅度为57 m,水位涨落会对岸坡造成塌岸影响。此外,该区域属于亚热带湿润季风气候区,具有冬温夏热、四季分明,降水丰沛,季节分配比较均匀的特点。因此,地下水动态变化一部分源于库水位波动,一部分源于降水补给。根据四川省气象站近年来的相关资料,年平均降雨量为1 137.8 mm,集中于下半年,最大单日

降雨量曾超过200 mm。2021-06-01—2022-06-01的库水位和降雨情况如图2所示。

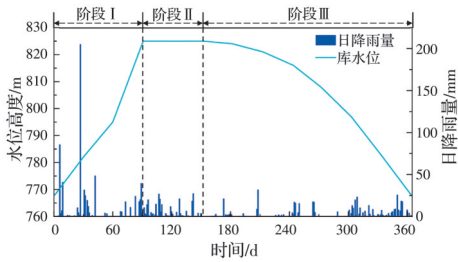


图2 白鹤滩库区2021-06-01—2022-06-01降雨和库水位数据统计

Fig. 2 Statistics on rainfall and reservoir water level in Baihetan reservoir area from 2021-06-01 to 2022-06-01

3 模型的建立与验证

3.1 边坡模型的建立

根据勘察报告,在暴雨、库水位作用下,攀枝花岸坡体稳定性下降,存在大规模塌岸的可能,而宁南岸相对稳定。因此,取攀枝花岸4-4'地质剖面进行建模分析,数值模型见图3,主要由粉质黏土、中密卵石层、白云碎裂岩、白云岩和漂卵石组成。表1列举了该岸坡岩土体的一些基本物理力学参数。

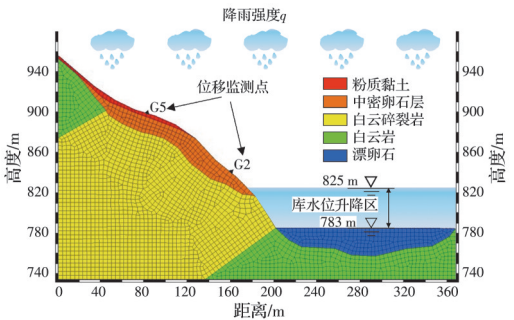


图3 黑水河岸坡模型

Fig. 3 Bank slope model of Heishui River

表1 模型中的岩土体基本物理参数

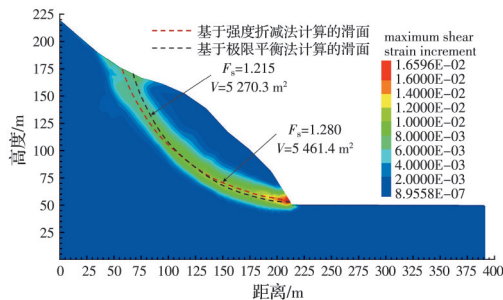
Table 1 Basic physical parameters of the geotechnical bodies in the model

岩石名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	有效黏聚力 $c'/(\text{kPa})$	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	饱和渗透系数 $k_s/(\text{m}/\text{s})$
粉质黏土	19.5	1 950	26.8	15.6	5.79×10^{-7}
中密卵石层	22.5	2 250	125	33.0	2.15×10^{-4}
白云质碎裂岩	23.1	2 310	110	33.2	9.26×10^{-6}
白云岩	23.8	2 380	275	39.3	9.26×10^{-7}
漂卵石	20.1	2 010	0	25.0	1.39×10^{-3}

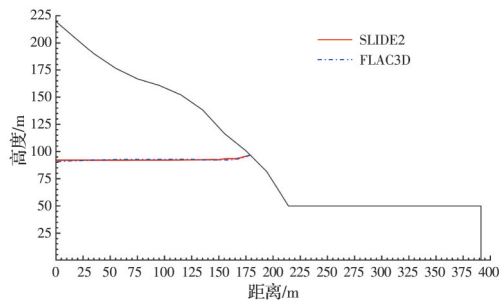
3.2 模型有效性验证

采用SLIDE2^[17]和FLAC3D两款软件的计算结果对比验证,在库水位以1 m/d的速度从820 m上升到825 m的同时,考虑水平加速度为0.1g的地震

力影响,使用两种软件分析黑水河岸坡的稳定性,结果如图4所示。由图4可以发现,两者的浸润线分布基本一致。同时,基于SLIDE2、FLAC3D两种软件以及勘察报告计算出来的安全系数分别为1.215、1.280和1.230,三者误差小于5%^[18-19]。可见,建立的模型合理有效。



(a) 滑面及安全系数对比



(b) 浸润线对比

图4 不同数值软件结果对比

Fig. 4 Comparison of results of different numerical software

3.3 滑面的识别及滑动体积的提取

考虑到边坡失稳范围与滑动体积密切相关,采用边坡滑动体积简要评估边坡的失稳范围。首先,根据FLAC3D强度折减法计算的结果文件,对边坡全局的节点信息以及相应的位移场进行提取。其次,当边坡处于破坏或者临界状态时,边坡滑移区的节点位移显著大于稳定区的节点位移。因此,基于位移信息进行聚类分析,并设定聚类的位移临界值,通过单元体编号,将被归类为“滑动”的所有单元体体积相加,从而得到滑体的总体积。图5为基于FLAC3D计算的位移云图以及上述方法聚类分析得到的滑体,由图5可以发现,该方法可以有效捕捉滑坡中位移较大的区域。另外,由图4(a)可以发现,通过FLAC3D和SLIDE2计算的滑面分布范围大致相同,同时,基于聚类分析得到的滑动体积 $V=5\,461.4\text{ m}^3/\text{m}$ (后文以 m^2 计),而通过SLIDE2自动计算的滑动体积 $V=5\,270.3\text{ m}^2$ 。两者计算结果的偏差可能源于计算方法和网格划分的不同。另外,在配置为Intel Core i5-10400 CPU clocked at

2.9 GHz的电脑上,基于上述方法对100次随机有限元计算文件提取滑动体积耗时约30 s。因此,基于Fish语言编写的脚本,结合聚类分析算法,可以高效准确地提取滑动体积。

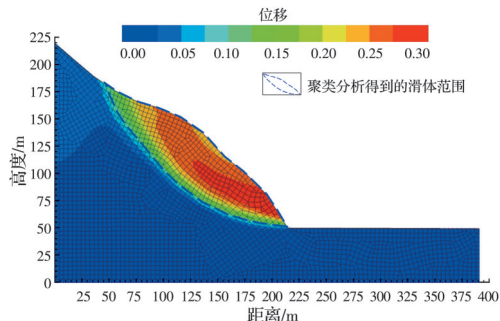


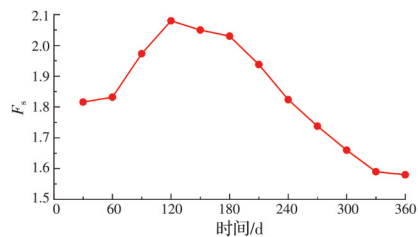
图5 基于位移云图聚类分析得到的滑体范围

Fig. 5 Slip range obtained from clustering analysis of displacement contour

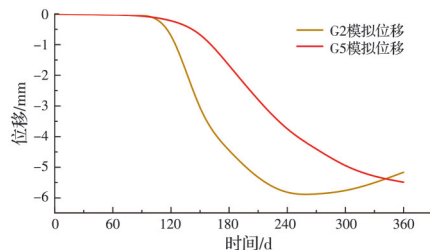
4 确定性分析

4.1 基于实测数据的边坡1 a稳定性分析

根据图2中降雨和库水位变化实测数据可以发现,白鹤滩库区1 a库水位的周期性变化可以大致划分为3个阶段,包括库水位上升期、平稳期和下降期。图6为基于实测数据的库岸边坡稳定性分析结果,包括安全系数和两个监测点(G2和G5)的位移。由图2可以发现,在库水位上升阶段,降雨较为集中,降雨强度较大,单日最大降雨量超过200 mm。然而对比图6(a)中的安全系数变化可以发现,在暴雨作用下,边坡的安全系数为1.82,并且随着库水位的上升持续升高到2.08;在库水位平稳阶段,库



(a) 安全系数



(b) 监测点位移

图6 基于1 a降雨和库水位数据的边坡稳定性分析
Fig. 6 Slope stability analysis based on annual rainfall and reservoir water level data

水位维持在 825 m,降雨较为频繁但强度不大,对边坡的稳定性影响较小,边坡安全系数维持在 2.00 左右;在库水位下降阶段,降雨量较少,主要考虑库水位的影响。可以发现,随着库水位的下降,安全系数下降到 1.58。总体来说,由于当地 1 a 整体降雨量不大,边坡本身渗透系数也较小,所以降雨对边坡 1 a 整体稳定性的影响不大。另外,根据图 6(b),两个监测点 1 a 的位移大概 5~6 mm,位移量不大(注:图中负号表示岩土体向坡外移动)。因此,可以推断,该边坡主要发生局部小规模变形,坍塌规模较小,这与勘察报告和实地调查结论相吻合。

相比之下,库水位的变化对该边坡 1 a 稳定性有很大影响,这是由于库水位涨落引起的坡体内部孔压的变化存在滞后效应。从图 7 可以看出,在初始阶段,孔压保持稳定,坡体内水位和外部库水位保持一致,浸润线呈水平分布;在水位上升阶段,坡体内水位变化滞后于库水位,导致浸润线向上弯曲,与此同时,库水位上升对边坡岩土体产生浮托作用,有利于边坡稳定,导致边坡安全系数上升;在库水位下降阶段,坡体内水位的变化滞后于库水位,坡内地下水更多补给库水,产生了朝向坡外的渗透力,此时浸润线向下弯折,同时坡体内产生超孔隙

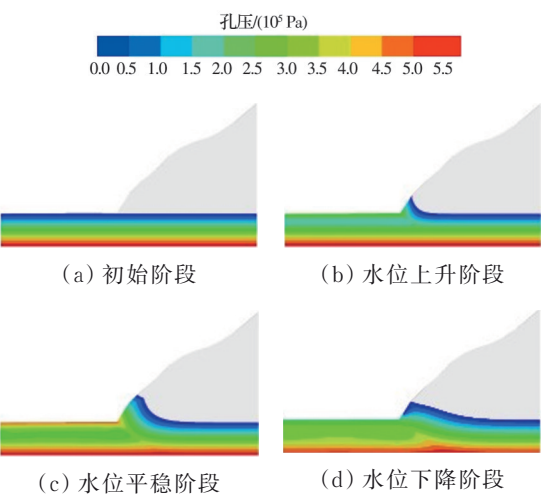


图 7 库水位变化阶段孔压云图
Fig. 7 Contour of pore pressure at different stages

表 2 降雨和库水位作用下的最不利工况设计

Table 2 Design of most unfavorable working conditions under the combined effects of rainfall and reservoir water level				
工况	时间	水库水位	降雨	影响因素
工况 1		保持在 825 m	月降雨量 400 mm	仅考虑降雨的影响
工况 2	1 个月	从 825 m 下降到 783 m,下降速度为 1.4 m/d	无	仅考虑库水位的影响
工况 3		从 825 m 下降到 783 m,下降速度为 1.4 m/d	月降雨量 400 mm	考虑降雨和库水位共同作用的影响

图 9 为 3 种最不利工况下边坡的安全系数与滑动体积。对于工况 1, $F_s=1.508$, 尽管边坡的滑动体积较大,但相比于工况 2 和工况 3,整体位移量级

水压力,基质吸力下降,边坡的抗剪强度降低,从而引发边坡失稳。图 8 为库水位上升、平稳、下降 3 个阶段的滑动面。由图 8 可以看出,在库水位上升过程中,滑面由坡脚逐渐向上延伸,逐渐到达坡顶区域,形成一个贯穿的圆弧滑动面,边坡变形逐渐增大;而在库水位下降过程中,滑面又从贯穿坡顶的圆弧滑动面退化到坡脚部分,边坡的变形又从坡顶区域逐渐开始减小。

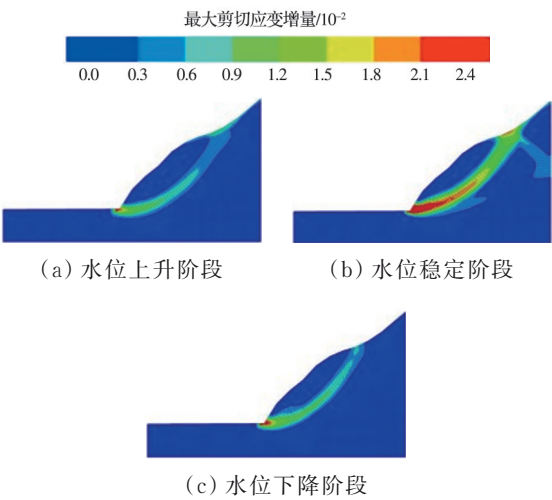


图 8 库水位变化不同阶段滑面云图
Fig. 8 Contour of slip surface at different reservoir level variation stages

4.2 最不利工况的确定与分析

尽管基于 1 a 降雨和库水位变化实测数据的模拟结果表明该边坡的稳定性较高。但当地历史水文资料表明,白鹤滩库区黑水河流域存在库水位下降速度超过 1 m/d 的骤降期。图 6(a)表明库水位下降阶段边坡的安全系数显著降低,同时,虽然库区当地 1 a 的降雨量整体不大,但也出现过日降雨量超过 200 mm 的极端暴雨天气,并且当月降雨量超过 400 mm,从而影响边坡的稳定性。因此,为了更准确地评估该边坡在最不利条件下的稳定性,选择 1 个月为研究周期,3 种典型最不利工况的设置见表 2。

较小,表明降雨作用下边坡的稳定性较高。这是因为降雨主要引起边坡表层孔隙水压力的变化,同时,由于雨水持续下渗,导致地下水位线也略有抬

升,如图10(a)所示。然而,在此过程中坡体内部渗流场并未发生显著改变,因此尚未危及边坡的稳定性。另一方面,尽管库水位渗入坡体会扰动更大范围的岩土体,但较高的库水位会对边坡有一定的支撑作用,所以整体变形量级不大。对于工况2,在一个月周期内,库水位从最高点下降到最低点后,边坡的稳定性显著下降,此时主要影响区位于坡脚段,对边坡上部影响较小,因此边坡的滑动体积较小。对于工况3,由于降雨整体影响较小,降雨和库水位共同作用下的安全系数、滑动体积与工况2都较为接近。由此可见,降雨对整个边坡的影响较小,而库水位变化是影响边坡稳定性的关键因素。

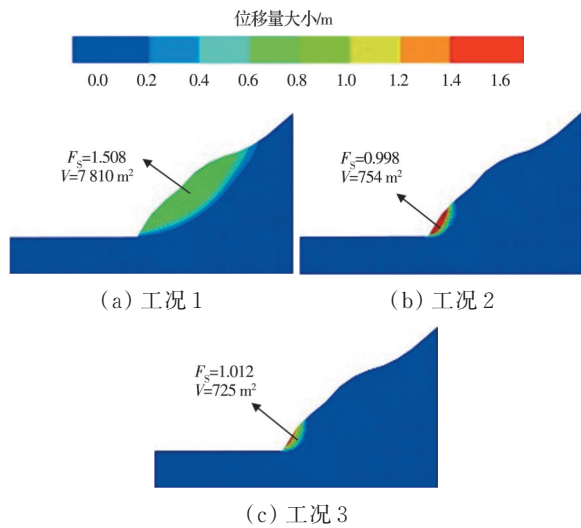


图9 最不利工况的滑面对比

Fig. 9 Comparison of slip surfaces under the most unfavorable cases

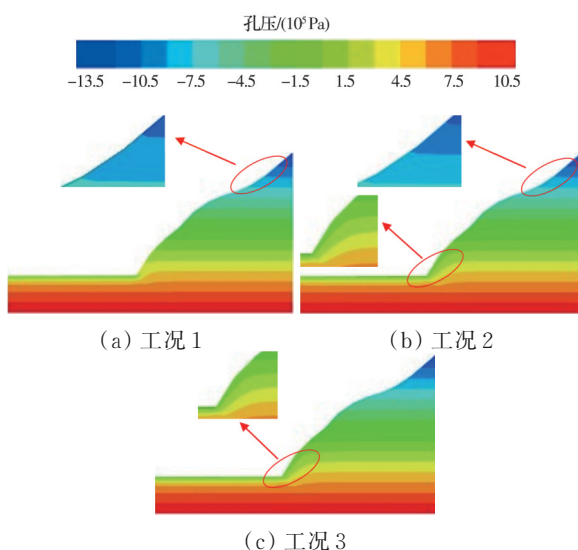


图10 最不利工况的孔压分布对比

Fig. 10 Comparison of pore pressure distributions under the most unfavorable cases

5 不确定性分析

5.1 随机场模拟区域的确定

在不确定性分析中,主要考虑 c' 、 φ' 和 k_s 的空间变异性,变异系数分别为0.4、0.1和0.6,水平和竖向波动范围分别为40、4 m, c' 与 φ' 的互相关系数为-0.5,参数的取值参照勘察报告与文献[20]。另外,为了在边坡可靠度分析中考虑岩土体参数非平稳特性的影响,基于实测钻孔数据和文献[16, 21], c' 、 φ' 和 k_s 沿埋深方向的变化梯度分别为0.04 kPa/m、 $0.01 (^{\circ})/\text{m}$ 和 $-7.5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。

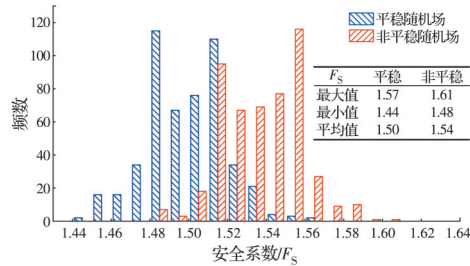
计算效率是可靠度计算中需要考虑的问题之一。地勘资料表明,白云碎裂岩的物理参数呈较大的不均匀性和空间变异性,且针对类似库岸边坡的稳定性研究,众多学者^[5,22]也考虑了岩土体参数空间变异性的影响。此外,工况2的计算结果显示,仅考虑白云碎裂岩的空间变异性,计算的失效概率为45%,而考虑全部区域空间变异性,计算的失效概率为44.2%,两者非常接近,表明黑水河岸坡稳定性主要受白云碎裂岩的空间变异性影响。因此,为了兼顾计算效率与计算结果的准确性,在后续的边坡可靠度分析中仅考虑白云碎裂岩的空间变异性。

5.2 随机计算结果分析

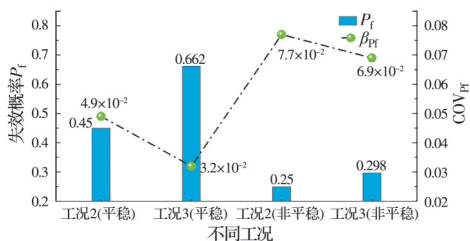
为了研究降雨和库水位变化等外部因素以及岩土体参数非平稳特性对边坡稳定可靠度的影响,分别在平稳和非平稳随机场中进行500次蒙特卡罗模拟,计算3种最不利工况下安全系数分布、失效概率和滑动体积变化,结果如图11所示。由图11(a)可知,工况1在平稳和非平稳随机场中安全系数的分布区间分别为[1.44, 1.57]和[1.48, 1.61]。根据Ding等^[23]提出的滑坡易发性类别表,认为安全系数大于1.4,属于较低风险区。而对于工况1,最小安全系数为1.44,边坡失效风险极低,因此,并未计算平稳和非平稳随机场中相应的失效概率。同时,也表明单独的降雨作用对边坡的稳定可靠度影响较小,不会引起边坡完全失稳。

图11(b)计算了工况2和工况3的边坡失效概率,同时, $\beta_{\text{Pf}} < 0.1$ 表明计算的失效概率收敛。库水位单独作用(工况2)计算的失效概率为45%,库水位和降雨联合作用(工况3)计算的失效概率为66.2%,两者差异较大。这是由于降雨会引起基质吸力减小,导致边坡的抗剪强度降低;同时,雨水的渗入使得因库水位下降而滞后于坡体内的水更难排出,从而产生更大的超孔压。两者共同作用导致边坡失稳概率增大。图11(c)为工况2和工况3的滑动体积频数分布直方图,不难发现,工况3的平均

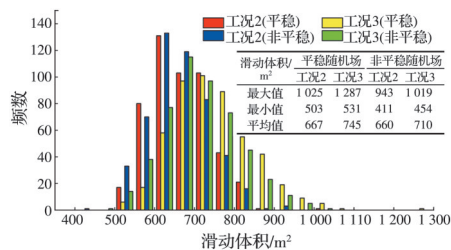
滑动体积明显大于工况 2。例如,在平稳随机场中,仅库水作用下,平均滑动体积为 667 m^3 ;库水位和降雨联合作用下,平均滑动体积为 745 m^3 。显然,降雨和库水位联合作用会导致边坡产生更大的滑动体积。这主要是由于库水位下降会导致滑动土壤中细颗粒的侵蚀和边坡沉积物的松动,而降雨往往会对边坡表层土体产生冲刷作用,从而增大边坡的变形,产生更大的滑动体积。



(a) 工况 1 的 F_s 频数分布



(b) 工况 2 和工况 3 的失效概率



(c) 工况 2 和工况 3 的滑动体积分布情况

图 11 不同工况的计算结果

Fig. 11 Calculation results for different cases

对比平稳和非平稳随机场的结果发现,如果忽略岩土体的非平稳性,计算的 F_s 偏小,失效概率偏大。例如,在非平稳随机场中,工况 2 和工况 3 的失效概率分别为 25% 和 29.8%,也远远低于图 11(b) 中计算的失效概率,这与 Gu 等^[16]的结果一致。另外,非平稳随机场中的滑动体积统计结果显示,对于工况 2,平均滑动体积为 660 m^3 ;对于工况 3,平均滑动体积为 710 m^3 。对比平稳随机场的计算结果,可以发现,考虑岩土体参数随深度变化的特性后,黑水河岸坡平均滑动体积将会减小。由此可见,非平稳随机场下失效概率与滑动体积的变化趋势与平稳随机场相同,但忽略岩土体参数随深度的变化,将会高估边坡失效概率和滑动体积,使计算结

果偏保守。因此,在评估滑坡风险后果时,需考虑岩土体参数的非平稳性。

6 结论

以白鹤滩库区黑水河岸坡为研究对象,基于降雨和库水位实测数据,以 3 种最不利工况对 1 a 周期内边坡稳定性进行计算。同时,基于随机有限差分法,分别在平稳和非平稳随机场中开展边坡可靠度分析。主要结论如下:

1) 1 a 周期内边坡稳定性计算结果表明,降雨的影响较小,而库水位变化显著影响边坡的稳定性。全年安全系数与库水位的变化趋势基本一致,库水位上升时,安全系数增大;库水位下降时,安全系数减小,最小安全系数出现在库水位快速下降阶段。因此,每年库水位下降时期是边坡预警和风险管理的重点时段。

2) 3 种最不利工况的分析结果表明,库水位从最高点快速下降到最低点将引起边坡失稳,导致坡脚区域发生显著变形。尽管降雨单独作用对边坡稳定性的影响较小,但降雨和库水位下降联合作用会显著增大边坡的失效概率与滑动体积。

3) 在对降雨和库水位作用下的边坡进行随机分析时,应考虑岩土体参数随深度变化的特性,否则,将会高估边坡的失效概率与滑动体积。因此,在边坡可靠度分析中需采用非平稳随机场,有助于准确评价边坡的失效风险。

参考文献

- [1] LI B, LI T, XU N W, et al. Stability assessment of the left bank slope of the Baihetan Hydropower Station, Southwest China [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 34-44.
- [2] 钱波, 杨莹, 徐奴文, 等. 白鹤滩水电站左岸边坡岩石损伤变形反馈分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1464-1471.
- [3] QIAN B, YANG Y, XU N W, et al. Feedback analysis of rock damage deformation of slope at left bank of Baihetan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1464-1471. (in Chinese)
- [4] XU L D, RONG G, QIU Q Y, et al. Analysis of reservoir slope deformation during initial impoundment at the Baihetan Hydropower Station, China [J]. Engineering Geology, 2023, 323: 107201.
- [5] CHEN X T, LI R J, HU B, et al. Deformation response and mechanical analysis of the Wangjiashan landslide in Baihetan Hydropower Station, China, during initial impoundment [J]. Bulletin of Engineering Geology

- and the Environment, 2023, 82(9): 344.
- [5] 薛阳, 吴益平, 苗发盛, 等. 库水升降条件下考虑饱和渗透系数空间变异性的白水河滑坡渗流变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1709-1720.
- XUE Y, WU Y P, MIAO F S, et al. Seepage and deformation analysis of Baishuihe landslide considering spatial variability of saturated hydraulic conductivity under reservoir water level fluctuation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1709-1720. (in Chinese)
- [6] ZHANG W G, TANG L B, LI H R, et al. Probabilistic stability analysis of Bazimen landslide with monitored rainfall data and water level fluctuations in Three Gorges Reservoir, China [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(5): 1247-1261.
- [7] WANG L, WU C Z, YANG Z Y, et al. Deep learning methods for time-dependent reliability analysis of reservoir slopes in spatially variable soils [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105413.
- [8] 王长虹, 杜昊东, 柳伟, 等. 考虑非饱和和渗透系数随机场统计特征的库岸老滑坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 327-335, 443.
- WANG C H, DU H D, LIU W, et al. Stability analysis of old reservoir bank landslide by considering spatial random field characteristics of unsaturated hydraulic conductivity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 327-335, 443. (in Chinese)
- [9] Itasca Consulting Group, Inc. Online manual of Flac3D fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimension [M]. V6.0. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2016.
- [10] CHEN J, HOPMANS J W, GRISMER M E. Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions [J]. Advances in Water Resources, 1999, 22(5): 479-493.
- [11] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils [J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [12] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [13] LI D Q, XIAO T, ZHANG L M, et al. Stepwise covariance matrix decomposition for efficient simulation of multivariate large-scale three-dimensional random fields [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 68: 169-181.
- [14] LI D Q, JIANG S H, CAO Z J, et al. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties [J]. Engineering Geology, 2015, 187: 60-72.
- [15] 蒋水华, 曾绍慧, 杨建华, 等. 不排水抗剪强度非平稳随机场模拟及边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1071-1081.
- JIANG S H, ZENG S H, YANG J H, et al. Slope reliability analysis by simulation of non-stationary random field of undrained shear strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 1071-1081. (in Chinese)
- [16] GU X, WANG L, OU Q, et al. Efficient stochastic analysis of unsaturated slopes subjected to various rainfall intensities and patterns [J]. Geoscience Frontiers, 2023, 14(1): 101490.
- [17] IncRocscience. Slide: 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes (version 8.0) [M]. Toronto, Canada: Rocscience Inc., 2021.
- [18] JIANG S H, LI D Q, ZHANG L M, et al. Slope reliability analysis considering spatially variable shear strength parameters using a non-intrusive stochastic finite element method [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 120-128.
- [19] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1994-2003.
- LI D Q, XIAO T, CAO Z J, et al. Slope risk assessment using efficient random finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1994-2003. (in Chinese)
- [20] PHOON K K, KULHAWY F H. Evaluation of geotechnical property variability [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 625-639.
- [21] YANG Q, ZHU B, HIRAISHI T. Probabilistic evaluation of the seismic stability of infinite submarine slopes integrating the enhanced Newmark method and random field [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2025-2043.
- [22] GU X, ZHANG W G, OU Q, et al. Conditional random field-based stochastic analysis of unsaturated slope stability combining Hoffman method and Bayesian updating [J]. Engineering Geology, 2024, 330: 107415.
- [23] DING Y N, LI D Q, ZAREI C, et al. Probabilistically quantifying the effect of geotechnical anisotropy on landslide susceptibility [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(8): 6615-6627.

(编辑 王秀玲)