

蓄水后典型土质岸坡降雨与地震稳定性区域分析

汪功茂^{1,2}, 石安池³, 陈建平⁴, 周燕国^{1,2}, 汪玉冰^{1,2*}

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 超重力研究中心, 浙江 杭州 310058;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 4. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 强降雨、地震等自然灾害频发地区, 边坡稳定性的区域分析通常采用无限边坡模型, 然而以往研究所选用的土层深度通常为粗略估计。本研究将钻孔实测的土层深度数据导入 ArcGIS 地理统计分析模块, 通过普通克里金插值方法构建区域边坡地层模型。运用插值所得土层深度数据, 通过无限边坡模型计算蓄水前、蓄水后、蓄水后降雨、蓄水后地震等不同工况下的边坡稳定性系数, 进一步分析蓄水后各工况下边坡稳定性系数的变化情况, 并绘制相应地图用于定位各工况下稳定性相对较低的区域。本文将上述研究方法应用到白鹤滩水电站水库上游区域。区域分析结果表明, 蓄水及降雨工况对于岸坡稳定性影响较小而地震工况下岸坡稳定性系数整体下降较大, 其中局部区域下降比例达到 50% 以上。研究结果可为区域边坡工程设计和场地防灾减灾规划提供参考。

关键词: 地理信息系统; 边坡稳定性; 区域分析; 克里金插值; 降雨; 地震

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)06-0468-09

Regional analysis of rainfall and seismic stability on typical soil bank slope after water storage

WANG Gong-mao^{1,2}, SHI An-chi³, CHEN Jian-ping⁴, ZHOU Yan-guo^{1,2}, WANG Yu-bing^{1,2*}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
2. Center for Hypergravity Experiment and Interdisciplinary Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China;
4. Zhejiang Huadong Construction Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: In areas with frequent natural disasters such as heavy rainfall and earthquakes, the regional analysis of slope stability usually adopts the infinite slope model. However, previous studies have often relied on rough estimates for soil depth selection. To address this limitation, this study imports measured soil depth data from boreholes into the geostatistical analysis module of ArcGIS and constructs a regional slope stratum model using the ordinary Kriging interpolation method. Utilizing the interpolated soil depth data, the slope stability factor is calculated for various working conditions, including pre and post-water storage, post-water storage rainfall, and post-water storage earthquake scenarios, using the infinite slope model. Furthermore, the study analyzes the changes in slope stability factor under different working conditions after water storage and generates corresponding maps to identify areas with relatively low stability under various scenarios. The research methods outlined above are applied to the upstream area of Baihetan Hydropower Station Reservoir. The regional analysis results indicate that water storage and rainfall conditions have a negligible impact on bank slope stability. However, the overall decline in bank slope stability factor under earthquake conditions is substantial, with some local areas experiencing a decline proportion of more than 50%. These findings can serve as valuable references for regional slope engineering design and site disaster prevention and reduction planning.

Key words: GIS; slope stability; regional analysis; Kriging interpolation; rainfall; earthquake

收稿日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51808490)。

作者简介: 汪功茂 (1997—), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要从事区域边坡稳定性风险分析方面的工作。E-mail: wanggongmao@zju.edu.cn。

*通信作者: 汪玉冰 (1987—), 男, 河北唐山人, 博士, 研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: wangyubing@zju.edu.cn。

0 引言

我国水资源丰富, 西南山区河流落差大, 开发利用河流资源可以实现当地社会经济高质量发展, 同时推动国家碳达峰、碳中和目标的实现。但是水电的大力开发建设, 附带对人居环境的影响也越来越大^[1]。以金沙江白鹤滩水电站为例, 其位于金沙江下游的攀枝花至宜宾河段, 坝址距上游巧家县 45 km。该水电站蓄水后, 淹没巧家县沿江一带岸坡, 库水会对县城沿江地带土质岸坡产生较大的影响。同时巧家县地属亚热带与温带共存的高原立体气候, 近年降雨量呈明显上升的趋势^[2]。该地区地质构造背景复杂, 地震活动频繁, 先后发生了 2014 年 8 月鲁甸 MS 6.5 及 2020 年 5 月巧家 MS 5.0 破坏性地震^[3]。这些因素将影响岸坡的稳定性, 进而影响到岸坡附近移民安置工程的安全。

国内外学者借助地理信息系统 (GIS) 进行不同工况下的区域边坡危险性研究, 技术相对成熟, 应用较为广泛。王萌^[4]运用 GIS 软件计算三峡库区水位上升及下降到某一高度时的水库岸坡稳定性系数, 对区域尺度的水库滑坡危险性进行了预测研究。BAUM 等^[5]基于数字高程模型 (DEM) 耦合降雨入渗导致的瞬态孔隙压力变化模型和无限边坡模型, 提出了定量评价降雨致浅层滑坡失稳的 TRIGRS 模型。MARIN 等^[6]则运用该模型研究哥伦比亚热带山区盆地降雨引起的滑坡失稳, 成功估算降雨强度和持续时间阈值。刘甲等^[7]基于 25 m 分辨率 DEM 数据, 考虑潜在地震影响, 提出了概率性地震滑坡危险性区域划新方法, 绘制研究区地震滑坡高危险性边坡分布地图。尽管通过 GIS 进行区域边坡危险性分析已经有了较为丰富的研究成果, 但是不同工况的危险性发展演化规律还少有文献提到。

无限边坡模型作为相对简单的极限平衡分析方法, 在区域边坡危险性分析中应用较为成熟^[4-9]。运用该模型计算稳定性系数时, 土层厚度通常根据研究区域的地质条件及历史滑坡数据进行粗略估计。如 JIBSON 等^[10]选取 1994 年加州北岭地震引发滑坡典型厚度, 绘制 Oat Mountain 地区的地震滑坡概率地图; CHEN 等^[11]选取 2014 年鲁甸地震浅层滑坡的常见厚度, 对震中研究区域进行危险性区划分析; RODRÍGUEZ-PECES 等^[12]基于 2011

年洛尔卡地震数据确定土层厚度参数的 4 种可能取值, 进行地震滑坡危险性概率研究; WANG 等^[13]参考甘肃天水地震历史滑坡数据, 选用典型土层厚度研究不同 Arias 强度下的 Newmark 位移。在计算区域内不同位置处, 选用相同的土层厚度对边坡稳定性系数进行计算, 会导致计算结果出现偏差。

本文以金沙江白鹤滩水电站库区巧家县城北门及附近库岸为研究对象, 基于研究区域的钻孔勘察数据, 运用普通克里金插值方法建立 GIS 地层模型, 相较于以往方法, 能够更准确地反映不同位置处边坡地层厚度的实际分布。随后运用无限边坡分析方法, 计算该区域在水库蓄水前、蓄水后、蓄水后强降雨以及蓄水后地震 4 种工况下岸坡的稳定性系数。通过岸坡稳定性系数的前后比较, 绘制出不同工况下的危险性变化地图, 分析土质岸坡的危险性演化规律, 可为白鹤滩水电站蓄水后巧家县城附近库岸边坡防护工程提供参考依据。

1 无限边坡模型稳定性分析方法

1.1 蓄水工况稳定性分析方法

对于浅部土体由多层土组成的边坡, 各层土的抗剪强度与层厚各不相同, 无法基于经验确定其潜在滑坡破坏的位置。因此采用无限边坡模型 (图 1) 计算该边坡的稳定性系数时, 应首先假定滑坡破坏面位于浅部各层土底部。取滑坡面位于不同土层底部稳定性系数 FS_i 的最小值作为边坡的天然状态稳定性系数 FS_{static} 。如图 1 所示, 在水库蓄水前, 浅部各土层均处于地下水位以上。

$$FS_i = \frac{c_i}{\sum_1 \gamma_i Z_i \cos \theta \sin \theta} + \frac{\tan \phi_i}{\tan \theta} \quad (1)$$

$$FS_{static} = \min(FS_1, FS_2, \dots, FS_i) \quad (2)$$

式中: c_i 、 ϕ_i 、 γ_i 分别为第 i 层土的黏聚力、内摩擦角、重度; Z_i 为第 i 层土顶部到底部的深度; θ 为坡度; $Z_i \cos \theta$ 为第 i 层土层厚度。

水库蓄水后, 对于完全处在库水位以下的边坡, 其稳定性受到自身重力与水压的双重影响; 对于处在蓄水位以上的边坡, 不考虑地下水的影响, 仍按天然状态进行计算。分析蓄水工况下的边坡稳定性, 首先对浅部各个土层进行蓄水后稳定性系数 FS_{wi} 计算, 最后取 FS_{wi} 的最小值作为边坡的蓄水工况稳定性系数 FS_{water} :

$$FS_{wi} = \frac{c'_i}{\sum_1^i \gamma'_i Z_i \cos \theta \sin \theta} + \frac{\tan \phi'_i}{\tan \theta} \quad (3)$$

$$FS_{\text{water}} = \min(FS_{w1}, FS_{w2}, \dots, FS_{wi}) \quad (4)$$

式中： c'_i 、 ϕ'_i 、 γ'_i 分别为第 i 层土的有效黏聚力、有效内摩擦角、浮重度。

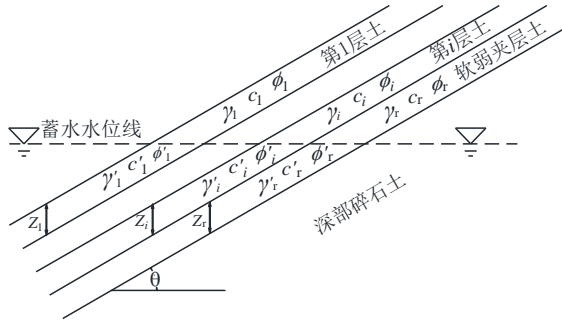


图1 无限边坡计算模型

Fig. 1 Infinite slope calculation model

1.2 降雨工况稳定性分析方法

(1) 降雨影响浅部土体稳定性分析方法

瞬态降雨入渗区域边坡稳定模型 TRIGRS

(Transient Rainfall Infiltration and Grid Based Regional Slope-Stability Model) 是基于 GIS 栅格的降雨诱发边坡稳定性计算程序，其包括入渗、水文、边坡稳定 3 个模块。入渗模块采用有透水边界模型，根据边坡土体的初始入渗速率、水力扩散系数、饱和渗透系数等条件，计算不同降雨持续时间、不同深度位置处的地下水压力水头 ψ ；水文模块则采用质量守恒模型计算降雨所产生的地表径流，该模块运行过程中土体达到饱和时，无法入渗的降雨将全部转化为地表径流，直接流向运算区域下游的其他栅格；边坡稳定模块耦合地下水压力水头的无限边坡稳定性分析公式。综上降雨工况下浅部土体稳定性系数计算公式为：

$$FS_{\min}(Z_i, t) = \frac{c'_i - \psi(Z_i, t) \gamma_w \tan \phi'_i}{\gamma_i Z_i \cos \theta \sin \theta} + \frac{\tan \phi'_i}{\tan \theta} \quad (5)$$

式中： Z_i 为浅部土体的深度； c'_i 、 ϕ'_i 、 γ_i 分别为浅部土体的有效黏聚力、有效内摩擦角、重度； t 为降雨持续时间； γ_w 为水的重度。

(2) 降雨影响深部土体稳定性分析方法

场地局部存在软弱夹层土时，强降雨过程中，雨水会通过优势通道渗流，使软弱夹层土达到饱和状态。土体强度将会下降，造成边坡安全性降低。当软弱土层位于地下水位以上时，该工况下边坡稳定性系数 FS_r 计算公式为：

$$FS_r = \frac{c'_r}{\left(\sum_1^i \gamma_i Z_i + \gamma'_r Z_r\right) \cos \theta \sin \theta} + \frac{\tan \phi'_r}{\tan \theta} \quad (6)$$

式中： c'_r 、 ϕ'_r 、 γ'_r 分别为软弱土的有效黏聚力、有效内摩擦角、浮重度； Z_r 为软弱土顶部到底部的深度； γ_i 、 Z_i 分别为软弱黏土上部第 i 层土的天然重度、软弱黏土上部第 i 层土体顶部到底部的深度。

1.3 地震工况稳定性分析方法

地震工况边坡稳定性分析中，拟静力法在工程中应用较多，可用于绘制滑坡危险性地图。该方法将地震动瞬时荷载施加在潜在滑体重心上，基于静态极限平衡理论，确定边坡拟静力稳定性系数^[14-15]。对于处在库水位以上的边坡，分析地震工况的边坡稳定性，首先对浅部各土层进行地震工况稳定性系数计算，最后取最小值作为库水位以上边坡的地震工况稳定性系数 FS_{eq} ：

$$FS_{eqi} = \frac{c_i + \sum_1^i \gamma_i Z_i \cos^2 \theta \tan \phi_i}{\sum_1^i \gamma_i Z_i \cos \theta \left(\sin \theta + \frac{\alpha}{g} \right)} \quad (7)$$

$$FS_{eq} = \min(FS_{eq1}, FS_{eq2}, \dots, FS_{eqi}) \quad (8)$$

式中： c_i 、 ϕ_i 、 γ_i 分别为第 i 层土的黏聚力、内摩擦角、天然重度； Z_i 为第 i 层土顶部到底部的深度； α 为顺坡向地震动加速度峰值。处于库水位及地下水位以下的边坡进行地震工况下稳定性分析时，各土层物理力学参数应采用有效黏聚力、有效内摩擦角、浮重度。

2 白鹤滩库区典型土质岸坡稳定分析

2.1 研究区概况

研究区域为库区云南省巧家县城的北门场地，坐落在金沙江右岸、巧家县城所在的不规则冲洪积缓坡台地，地势东高西低，东面为整体呈南北走向的山体，西面为金沙江。该区域地理范围为东经 $102^\circ 54' \sim 102^\circ 56'$ 、北纬 $26^\circ 54' \sim 26^\circ 56'$ ，总面积约为 8 km^2 ，最低海拔 645 m ，最高海拔 942 m 。

研究区域工程地质平面图的底图为比例尺达到 $1:2000$ 的地形图，在 ArcGIS 软件中对其进行地理处理，提取等高线信息及高程点信息，可转化为栅格分辨率为 5 m 的高精度数字高程模型 (DEM)。如图 2 所示，利用 ArcToolbox 表面分析工具对 DEM 进行处理，得到山体阴影地图，北门场地的地形特征得到良好可视化，同时将典型研究区位置标注其中。北门场地以石灰窑沟为界，划分为南

区、北区两片区域。靠近东部巧家县城区域已设置防洪堤, 地形以及土体分布有所改变, 该区域前期工程建设已完成精细化数值分析, 本次研究重点关注天然边坡区域。钻孔在研究区域有大量分布, 主要集中在场地东侧的巧家县城附近, 钻孔总数为 146 个, 其深度多分布在 20~50 m, 部分钻孔深度达 80 m 以上。白鹤滩水电站水库死水位 765 m, 到正常蓄水位 825 m 时, 将淹没上游北门场地的大部分计算区域, 即图 2 中蓝色区域。

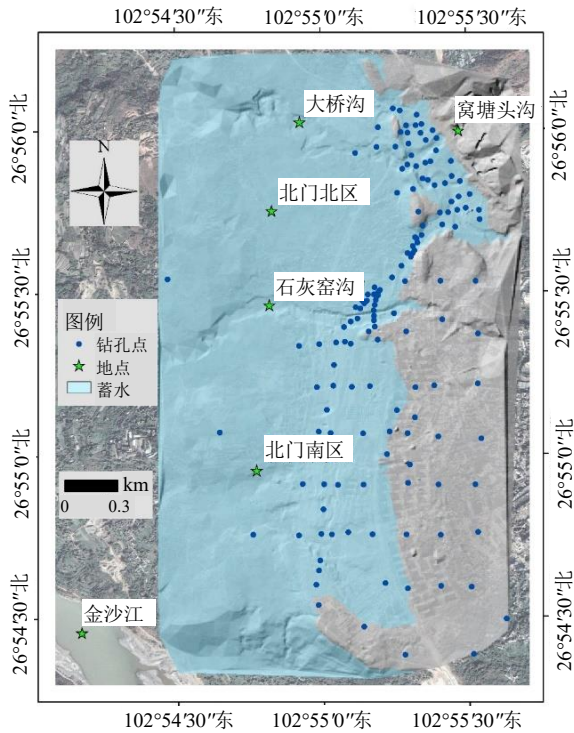


图 2 山体阴影地图
Fig. 2 Mountain shadow

采用 ArcGIS 表面分析工具对 DEM 进行坡度分析, 得到研究区域的坡度栅格图, 如图 3 所示。北门场地绝大部分区域坡度比较平缓, 坡角小于 10° 的区块约占 75%, 大于 20° 的区块约占 11%, 大于 30° 的区块约占 4.5%, 大于 40° 的区块约占 3%, 其中北区局部存在坡角大于 50° 的风化岩层。

2.2 土层分布及力学参数

整理钻孔勘探结果, 各土样分布情况有所不同, 以下 4 层土在场地浅层分布相对广泛, 其埋深按照土层编号自上到下: 第①层含砾黏土在场地大部分钻孔中均有揭露, 在北区局部厚度较大; 第②层碎石混合土主要分布在场地泥石流沟底部及沟谷两侧; 第③层有机土主要分布在北区的缓坡凹地、堰口等区域; 第④层粉土质砂在场地南区

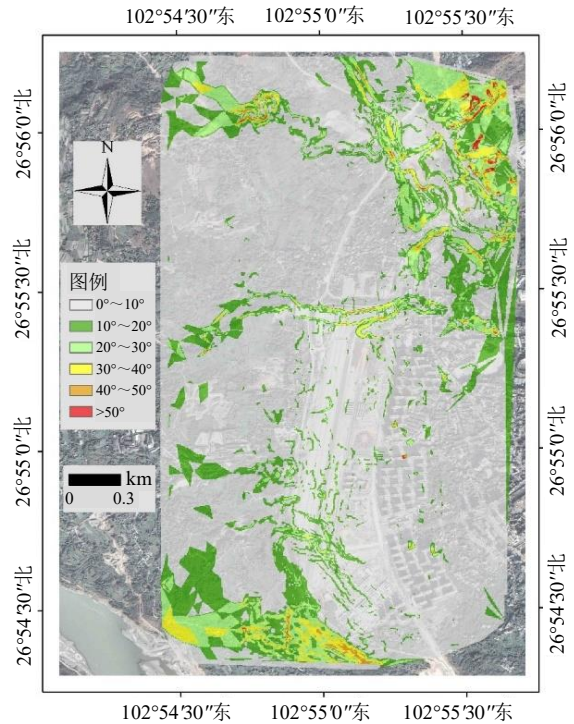


图 3 坡度图
Fig. 3 Slope map

分布较普遍, 在场地北区小范围分布。除此之外, 场地深部为强度高、厚度大的碎石土, 因此本文所采用的无限边坡模型假定的滑动破坏位于上方强度较低土层。

场地部分土体为局部分布。编号⑤粉质黏土为区域典型软弱夹层土, 在北门南区中部有分布。如表 1 所示, 该土体在含水量增加后其抗剪强度会急剧下降, 黏聚力值由 30 kPa 下降到 15 kPa。编号⑥洪积碎石土主要分布于大桥沟、窝塘头沟、石灰窑沟等泥石流沟底及沟谷两侧附近; 编号⑦堆积碎石土主要分布在窝塘头沟附近的岩质边坡浅层; 编号⑧冲积黏土主要分布于南区最南侧坡度较大的山坡。

本次研究各土样的物理力学参数, 来自于华东勘测设计研究院前期进行的室内土工试验以及原位测试, 主要包括三轴试验、直剪试验、十字板剪切试验、标准贯入试验等。综合上述试验结果以及地区经验值, 最终提出北门场地土体的物理力学参数地质建议值, 如表 1 所示。

2.3 地层模型构建

ArcGIS 地理统计分析 (Geostatistic Analysis) 模块普通克里金插值可基于钻孔中土层厚度数据的空间相关性构建场地全域的地层模型^[16], 进而确定各栅格单元边坡计算时所选取的滑体厚度, 同时该方

表1 研究区土层物理力学参数及分布情况

Table 1 Physical and mechanical parameters and distribution of soil samples in the study area

土层编号	土层名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(\circ)$	c'/kPa	$\phi'/(\circ)$	土层埋深范围/m	土层深度平均值/m	备注
①	含砾黏土	19.2	9.7	40	18	35	15	0~24.8	5.5	分布广泛
②	碎石混合土	18.3	11.1	5	36	0	33	1.0~36.0	5.8	分布较广泛
③	有机土	18.6	11.4	25	12	20	7	1.6~28.7	6.0	分布较广泛
④	粉土质砂	20.0	11.0	2	28	1	26	1.1~40.6	2.0	分布广泛
⑤	粉质黏土	18.5	9.5	30	20	15	20	7.5~23.7	1.8	局部分布
⑥	洪积碎石土	19.0	11.0	5	37	0	36	0~5.0	5.0	局部分布
⑦	堆积碎石土	18.3	11.1	5	36	0	33	0~10.0	10.0	局部分布
⑧	冲积黏土	19.2	10.2	80	22	60	19	0~15.0	15.0	局部分布

法被验证可以对场地地下水位分布进行空间插值^[7]。

普通克里金插值常用的半变异函数有球形模型、指数模型、高斯模型等，交叉验证模块可计算不同半变异函数的插值精度。即假设某一个钻孔的要素值未知，通过其余位置处的数据得出该钻孔的预测值，然后轮流改变钻孔，最后计算所有钻孔的实际观测值与估计值的各项误差。通过比较误差值，选用适合普通克里金插值的半变异函数模型。首先在图2所示的ArcGIS钻孔点要素中关联各钻孔点位置处的土层厚度及地下水埋深数据，然后分别采用上述3种不同的半变异函数进行普通克里金插值，通过交叉验证方法来确定精度最高的插值方法。以第①层含砾黏土为例，其交叉验证结果如表2所示。计算场地各土层深度及地下水埋深插值的交叉验证数值，根据误差判别标准，最终确定指数模型作为北门计算区域克里金插值所选用的半变异函数。在ArcGIS地理统计分析模块中，采用指数模型普通克里金插值，可得出浅部4层土样的深度以及地下水深度插值结果，图4、图5分别为第①层、第②层土深度（层顶到层底竖向距离）插值地图。

将插值地图与2.2节中土层实际分布对比，在钻孔分布密集区域或者没有明显的山体、山沟区域，即使钻孔数据量不足，插值结果也与实际相符；在大桥沟、石灰窑沟、窝塘头沟及其附近山坡、北门南区山坡，根据克里金插值出来的结果并未考虑到岩土体的侵蚀搬运作用，与实际分布不符。对表1中所列局部分布4类土，结合具体地质情况确定其分布位置及深度。地下水插值结果表明86%计算栅格的地下水位深度大于15m，绝大部分浅层土体位于地下水位以上。本文假设蓄水

表2 第①层含砾黏土克里金插值交叉验证表

Table 2 Cross validation table of Kriging interpolation for pebbly clay layer ①

克里金模型	平均值	均方根	标准平	标准均	平均标
误差			均值	方根	准误差
高精度判定标准	接近0	数值小	接近0	接近1	接近均方根
球面模型	-0.056	3.280	-0.015	0.923	3.865
指数模型	-0.037	3.370	-0.009	0.936	3.870
高斯模型	-0.062	3.270	-0.016	0.925	3.888

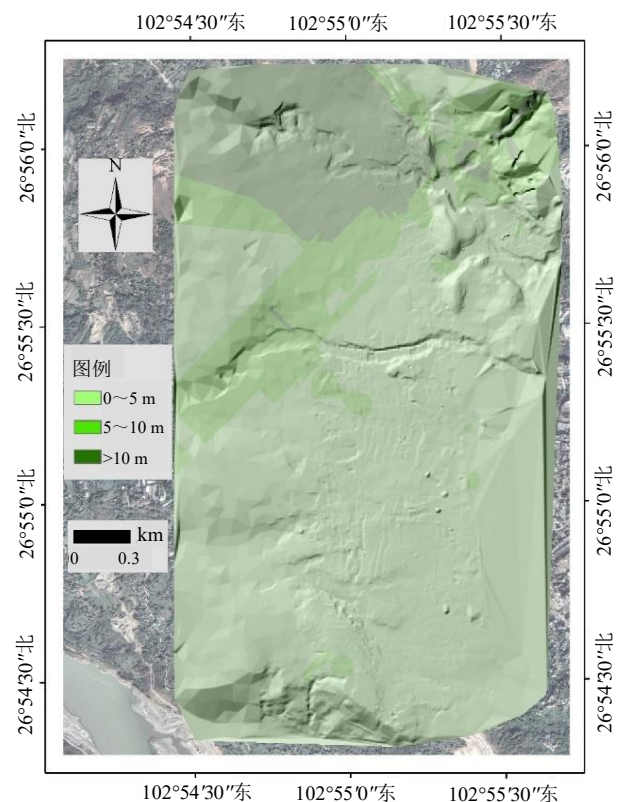


图4 第①层土深度插值地图

Fig. 4 Interpolation of the thickness of layer ① soil

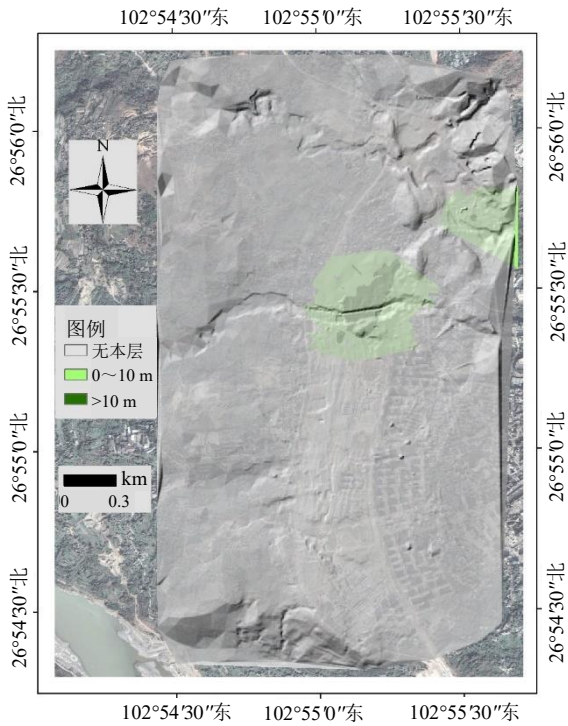


图 5 第②层土深度插值地图

Fig. 5 Interpolation of the thickness of layer ② soil

前土体为天然状态, 边坡稳定性分析采用天然状态指标。

2.4 降雨、地震条件

巧家县地属亚热带季风气候, 年内降雨量差异显著。查阅当地气象台站 1981—2020 年降雨资料, 巧家县多年平均降水量为 844 mm, 历年最大单日降水量为 109.9 mm。基于上述数据, TRIGRS 模型所选取降雨持续时间为 24 h, 每小时降雨量为 4.6 mm。已有边坡降雨入渗研究表明, 降雨主要对浅层土体造成影响, 均质岩土体内雨水入渗深度有限^[18-19], 一般不超过 5 m。北门浅部土层为第 ①层含砾黏土, 设定为 TRIGRS 模型计算土层, 如图 4 所示局部区域深度大于 5 m, 因入渗深度有限, 取 5 m 进行计算, 该模型其他计算参数详见表 3。当计算区域存在优势渗流通道时, 强降雨会造成深部软弱黏土强度降低。本文首先根据钻孔勘察数据确定软弱夹层即表 1 中编号⑤粉质黏土分布范围, 随后通过普通克里金方法插值出钻孔半径 100 m、埋深 25 m 以内的软弱夹层土的深度栅格, 进行后续稳定性系数计算。

巧家县城具有比较高的区域地震活动背景, 在中国地震动峰值加速度区划图^[20]中, 巧家北门研究区域位于 0.2 g 区内, 白鹤滩水电站坝址靠近 0.2 g 区与 0.3 g 区的分界线。本文地震工况分析较为保守, 采用白鹤滩水电站场址地震动数据, 即超

越概率为 50 年 10% 的基岩水平向峰值加速度 0.213 g 用于地震工况分析。同时考虑地震动放大效应, 采集场地土样进行土质边坡离心机振动台试验以确定研究区地震动放大系数。当振动台面加速度为 0.2 g 时, 距基岩不同高度的传感器所监测到的峰值加速度放大系数如表 4 所示, 基于线性拟合的方式, 可以得到地震动加速度放大函数。区域分析中, 取深部碎石土(图 1)顶部加速度为基岩峰值加速度, 基于上述加速度放大函数, 最终可确定滑体顺坡向地震动加速度峰值。

表 3 TRIGRS 模型输入参数

Table 3 TRIGRS model input parameters

有效黏聚力/ kPa	有效内摩 擦角/(°)	重度/ (kN/m ³)	初始入渗 速率/(m/s)	水力扩 散系数/ (m ² /s)	饱和和渗透 系数/(m/s)
35	15	19.2	7.0×10 ⁻⁹	7.0×10 ⁻⁵	7.0×10 ⁻⁷

表 4 峰值加速度放大系数

Table 4 Amplification coefficient of peak acceleration

距基岩高度/m	加速度放大系数
0	1.000
7.36	1.289
9.41	1.345
10.96	1.606
13.85	1.842

2.5 计算结果分析

在 ArcGIS 中, 将每一个栅格视为独立的坡体, 对坡度、土体物理力学参数进行数字化处理, 通过栅格计算即可获得稳定性系数, 并绘制地图。图 6 为天然状态边坡稳定性系数图, 灰色栅格稳定性系数大于 2, 区域占比达到 99% 以上, 为稳定区域; 绿色栅格稳定性系数为 1.5~2.0, 属于较为稳定区域; 黄色栅格稳定性系数为 1.0~1.5, 属于较高风险区域, 表明在施加其他荷载之后边坡可能发生失稳; 红色栅格主要分布在北门北区的山沟地区, 稳定性系数低于 1.0, 属于高风险区域。

图 1 所示无限边坡模型假设中, 忽略滑体上坡向土体对其施加的下滑力与下坡向土体施加的抗滑力, 一般情况下抗滑力大于下滑力, 导致稳定性系数计算结果偏低。稳定性系数随着计算厚度的增加而不断减小, 当计算厚度为浅层时, 下滑力与抗滑力差别不大, 对计算结果影响较小; 当计算厚度为深层时, 下滑力远小于抗滑力, 导致稳定性系数结果过于保守。本文重点评估不同工况

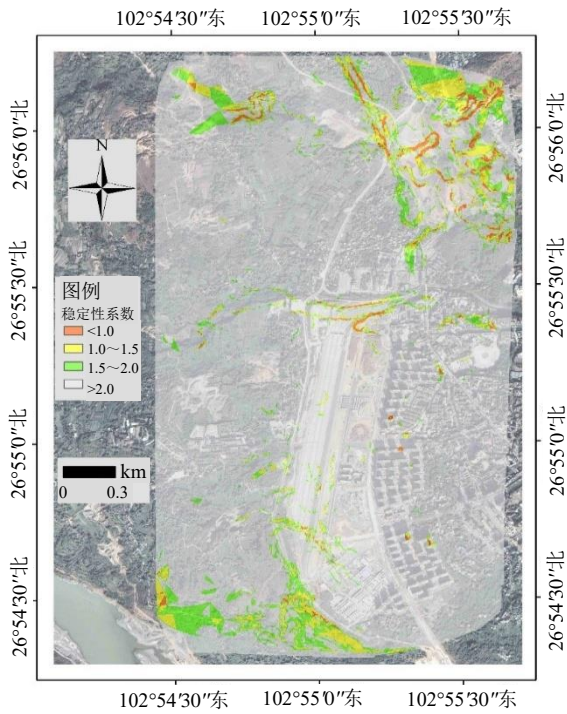


图6 天然状态边坡稳定性系数图

Fig. 6 Slope stability factor in natural state

下稳定性系数的变化规律,用统一的物理模型计算边坡稳定性系数,其变化值相较绝对值更具参考价值。因此图6中红色栅格不代表边坡处于失稳状态,仅表明在其他因素干扰下,相较其他位置处更易发生失稳。本文重点关注区域为较高风险区域与高风险区域,即图6中天然状态稳定性系数小于1.5区域,研究其在不同工况下边坡危险性演化规律。

对重点关注区域绘制蓄水、降雨、地震工况下相较天然状态的稳定性系数变化图。图7为蓄水工况稳定性系数变化图,蓝色部分为825 m蓄水位以下区域,黑色部分为蓄水位以上区域,图中未折减栅格仅针对重点关注区域,非重点关注区域稳定性系数变化情况未进行分析。蓄水位以下,绝大部分重点关注区稳定性系数未降低,该区域采用浮重度计算下滑力,而土体抗剪强度下降不大,边坡稳定性上升。绿色栅格和黄色栅格表明蓄水后重点关注区域稳定性系数为蓄水前的75%~100%和50%~75%,均有不同程度的下降。稳定性系数变化计算结果表明,随着蓄水位由765 m逐渐上升至825 m,边坡稳定性系数下降区域增加,图7中黄色栅格与绿色栅格范围相较765 m蓄水位时增多,大桥沟与窝塘头沟相邻区域整体稳定性下降较为明显,图中红色栅格表明稳定性系数下降比例达到50%及以上,需针对该区域做蓄水工况下的进一步数值模型分析。

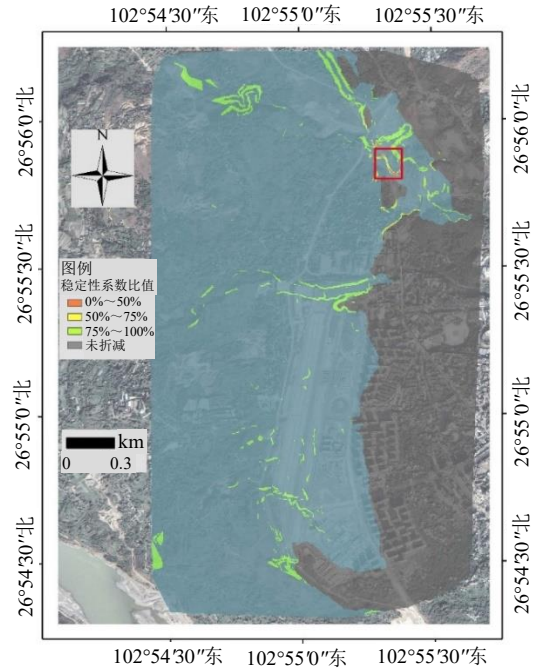


图7 蓄水工况稳定性系数变化图

Fig. 7 Variation of stability factor in water storage condition

降雨工况区域边坡的稳定性分析仅针对未蓄水区域。蓄水位825 m时,计算面积较小,因此选用水库死水位765 m进行降雨工况稳定性分析。综合浅部土体TRIGRS模型以及深部软弱土计算结果,绘制图8降雨工况稳定性系数变化图。降雨工况下,重点关注区域绝大部分稳定性系数未下降,北门南区局部出现稳定性系数降低25%~50% (黄色栅格),此区域存在深部软弱黏土夹层,降雨后边坡稳定性下降较大,需针对降雨工况进行数值模型分析。

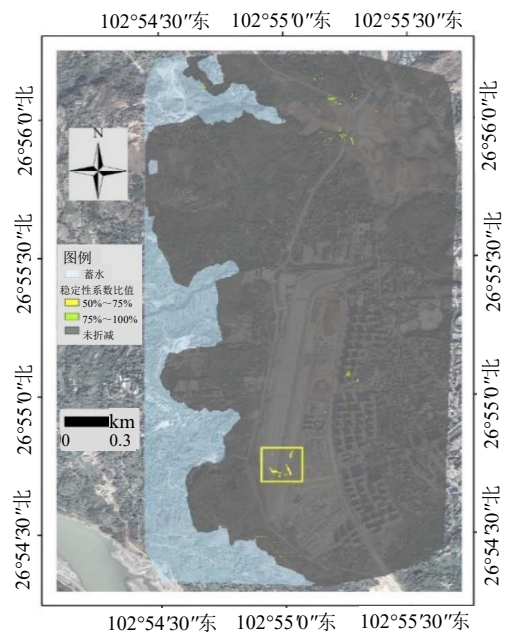


图8 降雨工况稳定性系数变化图

Fig. 8 Variation of stability factor in rainfall condition

图9为地震工况稳定性系数变化图,蓝色部分为825 m蓄水位以下区域,黑色部分为蓄水位以上区域。在地震动作用下,北门重点关注区域稳定性系数都出现了降低,北区部分区域稳定性系数降低较为明显,其中局部稳定性系数值下降达到了50%以上(红色栅格),表明本区域在地震来临时,与其他区域相比存在较大的边坡失稳风险,需针对地震工况进行数值模型分析。

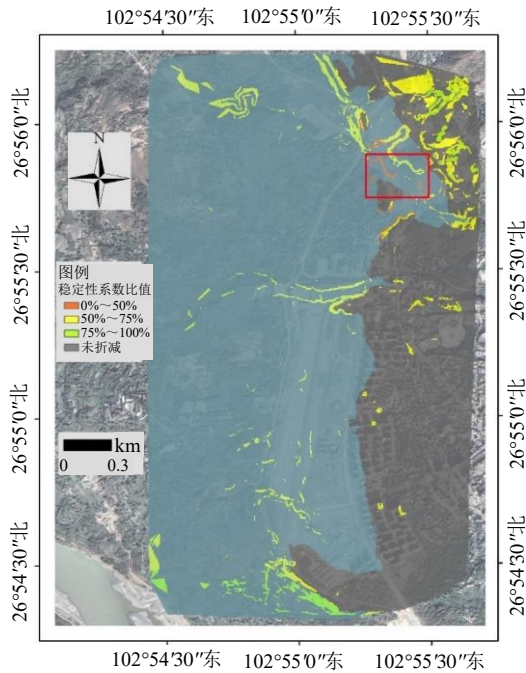


图9 地震工况稳定性系数变化图

Fig. 9 Variation of stability factor in earthquake condition

3 结论

本文基于普通克里金插值构建区域地层模型,采用无限边坡模型计算岸坡在不同工况下的稳定性系数及其变化值并绘制相应地图,完成岸坡稳定性的区域分析,得到了以下结论:

(1) 研究区域钻孔数据丰富时,本文采用指数函数模型的普通克里金方法所构建的地层模型精度较高,为岸坡稳定性分析提供了相对准确和比较可靠的数据。

(2) 蓄水及降雨工况对于巧家县北门岸坡稳定性整体影响较小,含深部软弱黏土夹层岸坡在降雨后稳定性下降较大;地震工况下岸坡稳定性系数整体下降较大,局部下降比例达到了50%以上。同时,稳定性系数分布及变化地图可以甄别出蓄水、降雨及地震各工况下岸坡危险性相对较高区域,如巧家县北门北区局部位置,后续可针对相关区域做进一步数值分析。

(3) 在岸坡稳定性的区域分析中,利用无限边坡模型获得的蓄水、降雨和地震各工况下的稳定性系数由于计算假设等原因可能偏低。然而在精细化数值模拟分析无法应用的大尺度区域分析中,采用统一的物理模型定量评估多工况下的边坡稳定性对于区域规划和风险研判有科学性、高效性和实用性等优点。

参考文献

- [1] 黄润秋,向喜琼. GIS技术在生态环境地质评价中的应用[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 98-101.
HUANG Run-qiu, XIANG Xi-qiong. Application of the GIS technique in the assessment of the eco-environment[J]. Regional Geology of China, 2002, 21(2): 98-101.
- [2] 袁震洲,方德祥,祝成锐,等. 云南巧家县降水量及蒸发量变化特征及趋势分析[J]. 大坝与安全, 2015(3): 50-54.
YUAN Zhen-zhou, FANG De-xiang, ZHU Cheng-rui, et al. Analysis on characteristics and trend of precipitation and evaporation variation in Qiaojia county[J]. Dam & Safety, 2015(3): 50-54.
- [3] 王长在,吴建平,刘雅宁,等. 巧家地震和鲁甸地震震源区周边P波速度结构[J]. 地震学报, 2021, 43(1): 1-12.
WANG Chang-zai, WU Jian-ping, LIU Ya-ning, et al. Three-dimensional P-wave velocity structure around the sources of Ludian and Qiaojia earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(1): 1-12.
- [4] 王萌. GIS支持下的水库型滑坡危险性空间分析预测——以三峡库区万州区库岸段为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
WANG Meng. Study on Reservoir-Landslide Spatial Hazard Analysis and Prediction based on GIS: with a case study in Wanzhou section of Three Gorges Reservoir[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [5] BAUM R L, SAVAGE W Z, GODT J W. Trigrs: a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0[R]. Colorado: US Department of the Interior and US Geological Survey, 2008.
- [6] MARIN R J, VELÁSQUEZ M F. Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides[J]. Geomorphology, 2020, 351(15): 106976.
- [7] 刘甲美,高孟潭,吴树仁. 概率性地震滑坡危险性区划方

- 法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3100-3110.
- LIU Jia-mei, GAO Meng-tan, WU Shu-ren. Probabilistic seismic landslide hazard zonation method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3100-3110.
- [8] WANG Y B, RATHJE E M. Probabilistic seismic landslide hazard maps including epistemic uncertainty[J]. Engineering Geology, 2015, 196: 313-324.
- [9] 马思远, 许冲, 王涛, 等. 应用 2 类 Newmark 简易模型进行 2008 年汶川地震滑坡评估[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 774-788.
- MA Si-yuan, XU Chong, WANG Tao, et al. Application of two simplified newmark models to the assessment of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 774-788.
- [10] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3-4): 271-289.
- [11] CHEN X L, LIU C G, WANG M M. A method for quick assessment of earthquake-triggered landslide hazards: a case study of the Mw6.1 2014 Ludian, China earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(4): 2449-2458.
- [12] RODRÍGUEZ-PECES M J, ROMÁN-HERRERA J C, PELÁEZ J A, et al. Obtaining suitable logic-tree weights for probabilistic earthquake-induced landslide hazard analyses[J]. Engineering Geology, 2020, 275: 105743.
- [13] WANG T, LIU J M, SHI J S, et al. Probabilistic seismic landslide hazard assessment: a case study in Tianshui, Northwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(1): 173-190.
- [14] JIBSON R W. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—a retrospective[J]. Engineering Geology, 2011, 122(1/2): 43-50.
- [15] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 93-104.
- WANG Tao, WU Shu-ren, SHI Ju-song, et al. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: a review[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 93-104.
- [16] 李晓军, 王长虹, 朱合华. Kriging 插值方法在地层模型生成中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 157-162.
- LI Xiao-jun, WANG Chang-hong, ZHU He-hua. Kriging interpolation and its application to generating stratum model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 157-162.
- [17] 阮本清, 许凤冉, 蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 573-579.
- RUAN Ben-qing, XU Feng-ran, JIANG Ren-fei. Analysis on spatial temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 573-579.
- [18] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151-158.
- ZHAN Liang-tong, WU Hong-wei, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151-158.
- [19] 石振明, 沈丹祎, 彭铭, 等. 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 977-985.
- SHI Zhen-ming, SHEN Dan-yi, PENG Ming, et al. Slope stability analysis by considering rainfall infiltration in multi-layered unsaturated soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(8): 977-985.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic Ground Motion Parameters Zonation Map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.