

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221680

三峡库区降雨型滑坡体型特征分析

查新元^{a,b}, 童富果^{a,b}, 薛松^{a,b}, 李彪^{a,b}

(三峡大学 a. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室; b. 水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 滑体作为降雨的载体,其体型特征与降雨入渗过程联系密切,是控制降雨型滑坡稳定性的关键内因。三峡库区降雨型滑坡(水利工程中稳定性对降雨敏感的滑坡一般统称为降雨型滑坡)众多,深入揭示降雨型滑坡的体型特征对于库区滑坡灾害的识别和防治具有重要意义。为此,搜集了三峡库区275个降雨型堆积层滑坡资料,统计分析了其体型特征。结果表明,坡度、坡表及滑带形状等体型特征均符合正态分布;就宏观体型特征而言,库区内降雨型滑坡体型狭长、厚度偏薄、坡度较缓;进一步结合典型滑坡降雨入渗过程的数值模拟发现,该体型滑坡受雨面积较大且入渗雨水更易侵入滑带,使降雨的作用较显著,不利于降雨条件下滑坡稳定。

关键词: 降雨型滑坡;滑体体型;降雨入渗;三峡库区

中图分类号: P642.22;TV697.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0142-04

1 引言

三峡库区广泛分布着以第四系松散土石体为主要物质组成的堆积层滑坡^[1],其稳定性受降雨影响显著^[2],是库区滑坡灾害的主要类型之一。水利工程中稳定性对降雨敏感的滑坡一般统称为降雨型滑坡,从现场观测、模型试验和数值模拟等角度研究降雨诱发滑坡的过程^[3,4],发现降雨可引起增载效应^[5,6]和材料参数弱化^[7]等不利影响。以往对降雨型滑坡的研究重点是关注降雨的作用机理,而对滑体体型这一承载降雨作用的关键因素研究相对较少,不能很好地阐明体型特征与降雨作用之间的内在联系。滑坡体是一个复杂的三维空间结构,空间量化描述困难,实际多采用典型二维主滑剖面进行简化。滑体剖面可视为由坡表和滑带曲线组成,以往通常依据曲线的凹凸特性对滑坡进行定性分类^[8],并对滑坡样本的类别、坡比、方量等特征进行统计分析^[9]。此外,通过构造方程实现了对滑带形状的数学描述^[10],但复杂方程对体型特征反映不够直观。以往针对体型的研究多为定性归类分析,缺乏深入探讨滑坡体型与滑坡机理之间的关系,尤其是对于滑坡

灾害频发的三峡库区的研究相对不足。鉴于,本文搜集了木鱼包、陈家沟等275个三峡库区降雨型滑坡资料,采用滑带形状参数、坡表形状参数、坡比和剖面面积四个参数量化并统计分析了滑坡样本的体型特征,并选取典型滑坡开展了降雨入渗数值模拟分析,以期揭示库区降雨型滑坡体型特征与降雨作用的内在联系,可为库区降雨型滑坡的早期快速判识及防治提供一定的参考。

2 三峡库区降雨型堆积层滑坡体型统计分析

2.1 滑体剖面体型的量化描述

滑体剖面可视为由滑带曲线 $f_1(x)$ 和坡表曲线 $f_2(x)$ 构成的平面几何形体,见图1。可采用坡比 H/L 、剖面面积 S 、滑带形状参数 X_a 、坡表形状参数 X_b 四个特征参数定量描述滑坡剖面的宏观体型特征。

(1)坡比 H/L 。是反映滑体剖面宏观倾斜程度的无量纲参数,为高度 H 与长度 L 的比值,其范围为 $(0, +\infty)$ 。

(2)剖面面积 S 。是反映滑体方量的宏观参数,为滑带曲线 $f_1(x)$ 和坡表曲线 $f_2(x)$ 所围的

收稿日期: 2022-08-15, 修回日期: 2022-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51939004);国家重点研发计划(2017YFC1501100)

作者简介: 查新元(1997-),男,硕士研究生,研究方向为滑坡失稳判识模型, E-mail: zxy_97@outlook.com

通讯作者: 童富果(1972-),男,博士、教授、博导,研究方向为多相多场耦合领域的数值理论及其方法, E-mail: tfg@ctgu.edu.cn

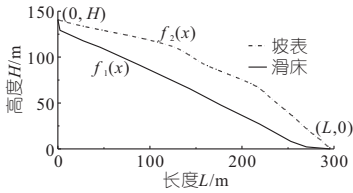


图 1 某滑坡剖面

Fig. 1 Profile description of landslide

面积,可表示为:

$$S = \int_0^L [f_2(x) - f_1(x)] dx \quad (1)$$

(3)滑带形状参数 X_a 。宏观上以滑带的凹凸特性作为形状描述指标,定义为滑带 $H/2$ 处对应的水平坐标 x ,为使不同滑带的形状参数具有可比性,进一步将其归一化为 x 与长度 L 的比值,其范围为 $(0, 1)$,可表示为:

$$X_a = \frac{1}{L}x \Big|_{(f_1(x)=\frac{1}{2}H)} \quad (2)$$

(4)坡表形状参数 X_β 。类似地,以坡表的宏观凹凸特性作为形状描述指标,定义为坡表 $H/2$ 处对应的水平坐标 x 与长度 L 的比值,其范围为 $(0, 1)$,可表达为:

$$X_\beta = \frac{1}{L}x \Big|_{(f_2(x)=\frac{1}{2}H)} \quad (3)$$

通过坡比 H/L 、剖面面积 S 、滑带形状参数 X_a 和坡表形状参数 X_β 四个体型特征参数,能有效地区分不同滑坡,可用于大量滑坡样本体型特征的统计分析。

2.2 降雨型滑坡体型特征

2.2.1 体型参数分布特征

搜集了三峡库区范围内共 275 个以降雨为主控诱因的滑坡样本,这些滑坡分布在由秭归至重庆巴南区的长江沿线各县区,以秭归至万州段分布最为集中;其中滑坡较多的地区包括秭归县(35 个)、巫山县(35 个)、奉节县(49 个)、云阳县(38 个)、万州(28 个)和涪陵(24 个)。对体型特征参数进行统计,结果见图 2。由图 2 可知,总体而言,滑体剖面的体型特征参数均呈先增大而后减小的趋势,其规律可采用正态分布函数描述,其中,剖面面积 S 的均值 μ 为 0.438 7、标准差 σ 为 0.269 5;滑带形状参数 X_a 的均值 μ 为 0.362 1、标准差 σ 为 0.109 8;坡表形状参数 X_β 的均值 μ 为 0.536 4、标准差 σ 为 0.128 1;坡比 H/L 的均值 μ 为 0.297 7、标准差 σ 为 0.138 0。

为评价各体型特征参数的拟合效果,引入了可决系数 R^2 ,其定义为:

$$R^2 = 1 - S_{s_{res}} / S_{s_{tot}} \quad (4)$$

式中, $S_{s_{res}}$ 为残差平方和; $S_{s_{tot}}$ 为总平方和。

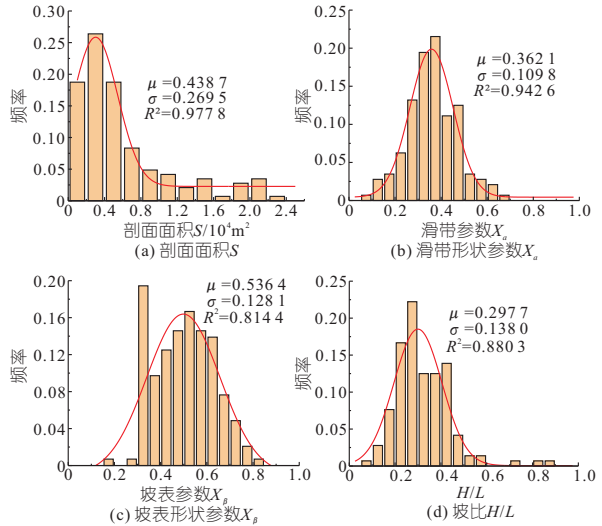


图 2 体型特征参数频率分布直方图

Fig. 2 Histogram of frequency distribution of geometric features

可决系数越接近 1 表示拟合效果越好。评价结果表明,可决系数均在 0.8 以上,拟合效果良好。此外,体型特征参数的均值和标准差表明,滑带主要呈凹型,坡表主要呈凸型;坡度较缓,集中分布在 $9.07^\circ \sim 23.54^\circ$ 的区间内,与文献统计结果较吻合^[9]。

2.2.2 体型分布特征

为进一步探究降雨型堆积层滑坡的体型特征,分析了体型特征参数之间的相关性。由于 4 个体型参数均为符合正态分布的连续型随机变量,因此采用皮尔逊相关系数^[11]来反映各参数之间的线性相关程度,相关系数的绝对值越大则相关性越强,见表 1。

表 1 体型特征参数的相关关系

Tab. 1 Correlation coefficient of geometric features

皮尔逊相关系数	X_a	X_β	H/L	S
X_a	1.000	0.469	0.177	-0.025
X_β	0.469	1.000	-0.102	-0.046
H/L	0.177	-0.102	1.000	-0.171
S	-0.025	-0.046	-0.171	1.000

由表 1 可看出,滑带形状参数 X_a 和坡表形状参数 X_β 的相关系数为 0.469,呈中等程度相关性,而其他特征参数间的相关性极弱,表明滑带与坡表之间具有更深层次的关系。

将样本点分布的二维空间等分为 64×64 的网格,采用高斯核函数计算空间内滑带形状参数与坡表形状参数的核密度分布,见图 3。图 3 中颜色越深表示核密度越大,样本分布越集中。由图 3 可知,核密度较大的区域出现在距离 X_a 与 X_β 各自的数学期望一个标准差的区间内,且该区域内 X_a 与 X_β 在数值上较接近,表明滑带和坡表

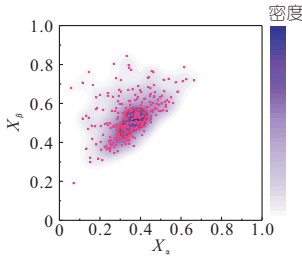


图 3 体型特征参数联合分布核密度图

Fig. 3 Kernel density map of joint distribution of geometric feature parameters

的凹凸程度差别较小,滑坡体形状偏薄。

3 滑坡体型特征与降雨作用的关联性分析

3.1 降雨入渗有限元计算模型

为揭示降雨型滑坡体型特征与降雨作用的内在联系,以三峡库区陈家沟滑坡主滑体剖面为例($X_\alpha=0.3647$ 、 $X_\beta=0.5033$ 、 $H/L=0.3676$),基于水气两相流理论,采用有限元分析模拟了陈家沟滑坡降雨入渗过程。

(1)计算网格及材料参数。选取陈家沟滑坡的主滑动剖面作为计算剖面,构建有限元计算网格见图 4。滑体水平方向跨度为 493 m,前后缘高差 184.45 m;模型水平方向总长度为 986 m,竖直方向高度为 400 m,共划分 2 587 个节点,2 489 个单元。

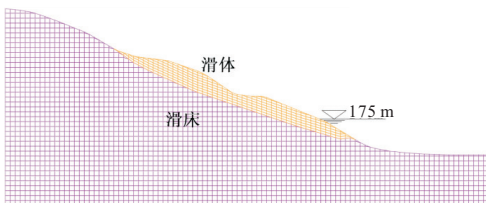


图 4 陈家沟滑坡有限元计算网格

Fig. 4 Finite element calculation grid of Chenjiagou landslide

滑体部分主要由第四系堆积物构成,由于滑带已确定,且重点关注降雨入渗对滑体的作用,因此假定滑体为均质材料,材料参数见表 2^[12]。计算中根据单元的饱和度近似以线性插值确定材料

表 2 滑体材料参数

Tab. 2 Landslide material parameters

$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		c/kPa		$\varphi/(\text{°})$		渗透系数 $/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	孔隙率
天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和		
22.5	23	16	10	25.5	20.5	5.0×10^{-3}	0.55

参数。

(2)边界条件及初始条件:①边界条件。上边界为降雨入渗边界和库水位边界,施加强度为 2.08 mm/h 的均匀降雨,滑体前缘库水位高程为 175 m,库水位以上为大气压力,库水位以下气压等于水压,其他边界为不透水、不透气的边界。②初始条件。为尽可能减小初始状态不确定性带来的影响,从坡体全饱和状态开始计算,计算模拟至坡体渗流场相对稳定,以稳定后的渗流场作为计算的初始条件。

(3)安全系数计算。采用应用广泛的剩余推力法计算降雨入渗过程中的安全系数变化。为兼顾增大条分数量提高精度及与有限元计算结果相结合的需求,依据有限元网格的宽度将滑体部分划分为 49 个条块。

3.2 降雨型滑坡降雨入渗过程分析

连续降雨 3、15 d 情形下坡内饱和度分布见图 5。由图 5 可看出,计算初始时刻(图 5(a))坡表饱和度 S_r 最小,约为 0.25,随着深度增大,饱和度逐渐增大,直至地下水位线处 S_r 等于 1。降雨开始后坡表饱和度迅速提升(图 5(b)),随着降雨历时增大,雨水不断下渗,降雨 15 d 后雨水已基本入渗至滑带附近(图 5(c))。

陈家沟滑坡的安全系数在降雨入渗过程中呈现出加速单调递减的趋势,降雨初期,滑体因降雨入渗导致重力增加,产生增载效应,此时雨水尚未入渗至滑带附近,滑带土的粘聚力提供的抗滑力未发生明显变化,因此总体抗滑力的增长慢于下滑力的增长,从而导致稳定性下降;由于滑体在天然和饱和状态下的重度相差较小,因此降雨初期滑坡安全系数减小的较慢。连续降雨 15 d 后,雨水已渗入滑带附近,使滑带土的饱和度增加,孔隙水压力增大,产生指向坡外的推力,增强了降雨的

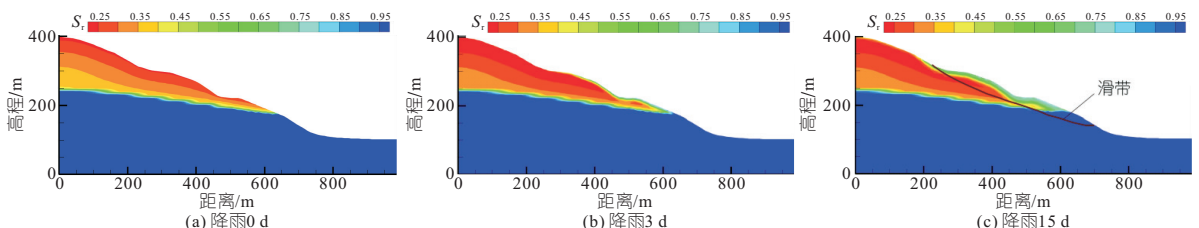


图 5 特征时刻饱和度分布

Fig. 5 Distribution of saturation at characteristic time

增载效应^[13],同时滑带土强度随饱和度的升高有所降低,安全系数加速减小。

陈家沟滑坡的体型特征能使降雨作用表现得更显著。由于滑体体型狭长、坡度较缓,因此水平方向上集雨长度相对较长,单位时间内的集雨量较大,是降雨能产生显著作用的重要前提;此外由于滑体较薄,渗径相对较短,降雨能更容易地入渗至滑带附近,使入渗雨水产生更显著的增载效应与滑带软化效应,不利于滑坡稳定。

针对不同滑体体型剖析了其降雨型滑坡主诱发因素的关联。若滑体偏厚,降雨在短期内将难以入渗至滑带附近,造成的增载效应及软化效应十分有限;若滑体偏陡,则滑体在水平方向的有效集雨长度将相对较短,入渗量也相对较少,更不易形成降雨型滑坡。三峡库区范围内具有狭长、厚度较薄、坡度较缓的主要体型特征的滑坡往往更容易成为降雨诱发型滑坡,实际工程中应有针对性地增大对此类滑坡的监测和治理力度。

4 结论

a. 三峡库区降雨型滑坡的体型参数分布规律均可采用正态分布函数进行描述,其可决系数均在 0.8 以上,拟合效果良好。

b. 滑体体型参数中仅滑带与坡表形状参数具有中等相关性,其关联规律表明,具有滑体狭长、厚度较薄、坡度较缓等主要体型特征的滑坡更易成为降雨型滑坡。

c. 降雨型滑坡的体型特征使坡表受雨面积较大且入渗雨水更容易侵入滑带,产生较显著的降雨增载与滑带软化效应,不利于滑坡稳定。

参考文献:

[1] 徐卫亚,周伟杰,闫龙. 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4):

87-94.

- [2] 钟灿书. 降雨条件下堆积层滑坡位移响应试验及预测[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 108-110, 114.
- [3] 汤明高,许强,黄润秋,等. 滑坡体基质吸力的观测试验及变化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 355-362.
- [4] 谢林冲,王明清,周超. 基于降雨-库水联合作用下三门洞滑坡演化过程与机制[J]. 水电能源科学, 2020, 38(6): 128-132.
- [5] MING-CHIEN CHUNG, TAN CHIH-HAO, CHEN CHIEN-HSIN. Local rainfall thresholds for forecasting landslide occurrence: Taipingshan landslide triggered by Typhoon Saola[J]. Landslides, 2017, 14(1): 19-33.
- [6] VADIVEL S, SENNIMALAI C S. Failure mechanism of long runout landslide triggered by heavy rainfall in Achanakkal, Nilgiris, India[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2019, 145(9): 4019041-4019047.
- [7] ZHANG S, XU Q, HU Z. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. Engineering geology, 2016, 204: 1-13.
- [8] 杨何,汤明高,许强,等. 长江三峡库区滑坡变形统计特征研究[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 37-42.
- [9] 杨忠平,李绪勇,赵茜,等. 关键影响因子作用下三峡库区堆积层滑坡分布规律及变形破坏响应特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 617-627.
- [10] 介玉新,刘占奎,郭政豪. 边坡滑动面构造的数学函数[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 108-120.
- [11] 尚敏,廖芬,马锐,等. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量化分析研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 742-750.
- [12] 吴亚子,傅荣华,王小群,等. 三峡水库区陈家沟滑坡地质特征与防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(1): 44-48.
- [13] 程庆超,童富果,刘刚,等. 考虑孔隙气压力影响的边坡稳定分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(7): 136-143.

Geometric Characteristic Analysis of Rainfall-induced Landslides in Three Gorges Reservoir Area

ZHA Xin-yuan^{a,b}, TONG Fu-guo^{a,b}, XUE Song^{a,b}, LI Biao^{a,b}

(a. Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management;

b. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The geometric characteristics of landslide are closely related to the rainfall infiltration process, which is the key internal factor to control the stability of rainfall-induced landslides. There are many rainfall-induced landslides in the Three Gorges Reservoir area, and it is of great significance to deeply reveal the body shape characteristics of rainfall-induced landslides (landslide whose stability is sensitive to rainfall in hydraulic engineering are generally referred to as rainfall-induced landslides) for the identification and prevention of landslide disasters in the reservoir area. In this paper, the data of 275 rainfall-type sedimentary landslides in the Three Gorges Reservoir area were collected, and their body shape characteristics were statistically analyzed. The rainfall-type landslides in the area are narrow and long, thin in thickness and gentle in slope. Combined with the numerical simulation of the rainfall infiltration process of typical landslides, it is found that the landslides of this type have a larger rain-receiving area and infiltrated rainwater is more likely to infiltrate the sliding bed, which makes the effect of rainfall more significant, and is not conducive to the stability of the slope under rainfall conditions.

Key words: rainfall-induced landslide; geometric characteristics; rainfall infiltration; Three Gorges Reservoir Area