

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.014

降雨和库水联合作用下万州石龙门滑坡体渗流稳定性分析

李明¹, 张恩铭², 郑阳², 张鹏², 黄皓¹

LI Ming¹, ZHANG En-Ming², ZHENG Yang², ZHANG Peng², HUANG Hao¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉430205;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 三峡库区库岸堆积层滑坡广泛发育, 其稳定性主要受降雨和库水位变动联合作用影响。本文以重庆市万州区石龙门堆积层滑坡为例, 建立精细地质模型, 采用有限元方法对该滑坡开展了数值模拟研究, 探讨其变形与稳定性的变化特征, 总结在降雨和库水位联合作用下堆积层滑坡的渗流响应规律。结果表明: 降雨和库水位下降是滑坡的关键诱因, 降雨会提升滑坡中后部地下水水位, 当降雨强度超出土体入渗能力后, 新增降雨多以坡面径流排泄, 而库水位变动影响前缘地下水水位及孔隙水压力。在库水位下降联合降雨作用下, 滑坡内部应力-应变及稳定性显著恶化, 渗流与水力梯度的增强加剧了滑坡不稳定性。本文研究可为堆积层滑坡的变形机制分析及监测预警提供参考。

关键词: 三峡库区; 堆积层滑坡; 有限元方法; 稳定性分析; 渗流特征

中图分类号: P534.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0170-15

Li M, Zhang E M, Zheng Y, Zhang P and Huang H. 2025. Seepage Characteristics and Stability Analysis of Wanzhou Shilongmen Landslide Under the Combined Effect of Rainfall and Reservoir Water. *South China Geology*, 41(1): 170–184.

Abstract: In the Three Gorges Reservoir area, piling layer landslides on the bank of the reservoir are widely developed, and their stability is mainly affected by the combined effect of rainfall and reservoir water level change. This paper takes Wanzhou Shilongmen piling layer landslide as an example, establishes a refined geological model, and carries out numerical simulation research on the landslide using the finite element method, to study the characteristics of the change of its deformation and stability, and to explore the seepage response law of the piling layer landslide under the combined effect of rainfall and reservoir level. The results show that: rainfall and reservoir level decline are the key triggers of landslides, rainfall will raise the groundwater level in the middle and back of landslides, and when the intensity of rainfall exceeds the infiltration capacity of the soil body, the additional rainfall is mostly discharged as slope runoff. The change of the reservoir level affects the groundwater level and pore water pressure at the leading edge. Under the combined effect of the reservoir water level drop and rainfall, the internal stress-strain and stability of the

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-12-17

基金项目: 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212012A C50021)

第一作者: 李明(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查研究, E-mail: lming@mail.cgs.gov.cn

landslide deteriorate significantly, and the enhancement of seepage and hydraulic gradient aggravates the landslide instability. This paper provides a useful reference for analyzing the deformation mechanism and monitoring and early warning of landslides in the accumulation layer.

Key words: the Three Gorges Reservoir area; accumulation landslide; the finite element method; stability analysis; seepage characteristics

近年来,随着三峡工程的建成和 145 ~ 175 m 水位蓄水,库区库岸水文环境改变诱发了许多新的滑坡灾害,堆积层滑坡是其中的典型灾害类型(罗世林等, 2024)。堆积层滑坡通常指第四纪地层中(除黄土、黏土及其他软土层外)的松散堆积层滑坡,广泛发育在河谷两岸缓坡地带(吴火珍等, 2010),由于该类滑坡结构松散、具大孔隙比、透水性强,主要受降雨和库水位变动的联合作用影响(Pang G X and Qiang Y, 2016),如意大利瓦伊昂水库滑坡、巫山县红岩子滑坡和云阳县鸡扒子滑坡(常宏, 2024)等,给人民生命财产安全带来了巨大威胁。因此,对库岸堆积层滑坡开展研究,尤其是复杂水文条件下滑坡渗流场的动态响应规律、变形与稳定性的演化过程与失稳机制的研究是当前的重点工作。

目前,许多学者针对降雨作用诱发滑坡开展了大量研究(陈慧娟等, 2023; 賁琰棋等, 2023; 杨诗诗等, 2023; 高晨曦等, 2024)。学者们普遍认为降雨增加了土体的重度,降低了土体强度,并产生渗透力作用,加大了滑坡的下滑力(Alonso et al., 1995; Coe et al., 2003; 吴火珍等, 2010; Pang G X and Qiang Y, 2016; Iadanza et al., 2016; 常宏, 2023, 2024)。如:代贞伟等(2016)采用非稳态非饱和渗流方法分析堆积层滑坡失稳机理,发现降雨前期主要通过增加滑体自重的方式降低坡体稳定性;张群等(2014)的研究表明,堆积层越薄,雨水入渗途径越短,基覆界面受雨水软化时间越长,土体抗剪强度衰减越大;朱元甲等(2020)利用物理模型试验研究了堆积层滑坡在间歇型降雨条件下的变形破坏特征,发现雨水的持续入渗会导致地下水位上升滞后于降雨,造成坡体内渗透力和孔隙水压增大,有效应力降低而诱发滑坡失稳。

在库水位对堆积层滑坡的稳定性影响机制方面,多数研究认为是库水位抬升导致的水岩相互

作用和孔隙水压力作用,以及库水位下降在土体间形成的渗透力加大了滑坡的下滑力(刘才华等, 2005; 殷跃平等, 2022)。库水与岸坡长期作用过程中,改变了库岸岩土体物质组成结构、化学成分以及渗透性、吸水性,引起岩土体抗剪强度等物理力学指标降低(梁宇等, 2021)。在许强和黄润秋(1995)将加载响应比理论引入滑坡领域后,王鲁男等(2016)则提出根据库水变动与滑坡稳定系数的正负变化率可判断库水位波动对滑坡的加卸载作用,叶润青等(2021)指出影响动水压力型滑坡稳定性的关键因子为库水位下降速率和水位降幅大小,浮托减重型滑坡则取决于库水位上升引起的浮托效应大小。

综上可知,地下水的渗流作用常常是导致堆积层失稳破坏的主要原因。针对库水位变动叠加降雨作用的影响研究,前人多基于滑坡渗流场进行分析。如邹祖银等(2016)、抗兴培等(2019)和高文军等(2021)基于饱和与非饱和理论,分析了降雨历时过程中不同降雨强度条件下边坡内部的渗流特征;张桂荣和程伟(2011)、周永强和盛谦(2014)及黄达等(2017)基于有限元模拟重点分析了耦合作用对滑坡稳定性的影响,指出库水位下降耦合降雨阶段滑坡最不稳定;李卓等(2017)、江强强等(2019)、许艺林等(2024)通过物理模型试验模拟滑坡的变形破坏特征,认为水对土体软化、浮力作用和动水压力是滑坡失稳的根本原因。

然而,以往大量研究工作多针对相对单一的滑坡水文条件,对于不同库水位状态与降雨的耦合作用、堆积层滑坡的渗流动态及变形机制的研究还存在不足。因此,本文以三峡库区万州石龙门滑坡为例,在分析前期勘察和监测数据基础上,基于有限元模拟研究其在复杂水文条件下的滑坡渗流-变形响应规律,探讨其稳定性变化特征,以期对库岸堆积层滑坡的诱发机制研究提供借鉴。

1 石龙门滑坡的发育与变形特征

石龙门滑坡位于三峡库区重庆市万州区大周镇的长江左岸沿江公路一带,是三峡库区典型的堆积层滑坡之一。滑坡地形前后陡、中间缓,后缘

高程约 210 m,前缘剪出口位于长江水位以下,高程约 135 m(图 1、图 2)。滑坡右侧以宽缓突出坡为界,左侧以自然冲沟及凹槽地形为界。滑坡平面呈矩形,纵长约 360 m,宽约 320 m,平均厚度约 18 m,体积约 $207 \times 10^4 \text{ m}^3$,属大型堆积层滑坡。



图 1 石龙门滑坡航拍图

Fig. 1 Aerial photo of Shilongmen landslide

石龙门滑体物质主要由粉质粘土夹块石组成,粉质粘土层粘性较强,透水性较弱。滑床发育在侏罗系中统沙溪庙组(J_2s)的粉砂质泥岩夹薄层砂岩中,岩体呈微透水性,在滑坡区后缘陡坡区以及滑坡两侧冲沟内可见少量基岩出露(图 3)。滑带土主要为紫褐色粉质粘土,发育于岩土接触带,表面清晰光滑,局部可见明显擦痕,受地下水的浸润土质较软。

石龙门滑坡自上世纪 80 年代起开始变形,滑坡前缘近长江部分出现塌岸、变形现象,后滑动变形持续发展,近年来仍在缓慢变形。滑坡区域上共布置 7 处地下水位监测孔(编号 ST1- ST7)和 6 个深部位移侧斜孔(编号 CX1- CX6),其中 ST1、ST2、CX1、CX2 位于滑坡左边界,ST3 位于滑坡后缘边界,ST4、ST5、CX3、CX4 位于滑坡右边界附近,ST6、ST7、CX5、CX6 位于滑坡之外(图 2)。

根据 2016 年 11 月-2019 年 12 月的库水位和降雨资料,对滑坡地下水监测数据进行分析(图 4),其中 ST6、ST7 由于距离滑坡位置较远不做分析。结合现场调查发现:ST1 附近建有排水沟,阻挡了地表水的入渗,地下水位埋深较大,其地下水位高度与库水位、降雨具有一定的响应关系。ST2 水位高度与降雨具有明显的响应关系,降雨事件发生,水位随即上升,降雨停止,则水位下降。ST3 水位高度亦主要与降雨事件有关,降雨发生后,地下水位未立即发生变化,而是具有一定滞后性,主要是由于地下水埋深较大,地下水渗流路径较长导致。ST4 附近分布有水塘,地下水充足,因此水位较高,地下水位主要由降雨控制。ST5 地下水水位与降雨、库水位相关性均不明显,可能与监测孔位置位于坡体平台有关,地下水渗流保持相对稳定。

根据 2015 年 1 月-2020 年 10 月的监测资料,

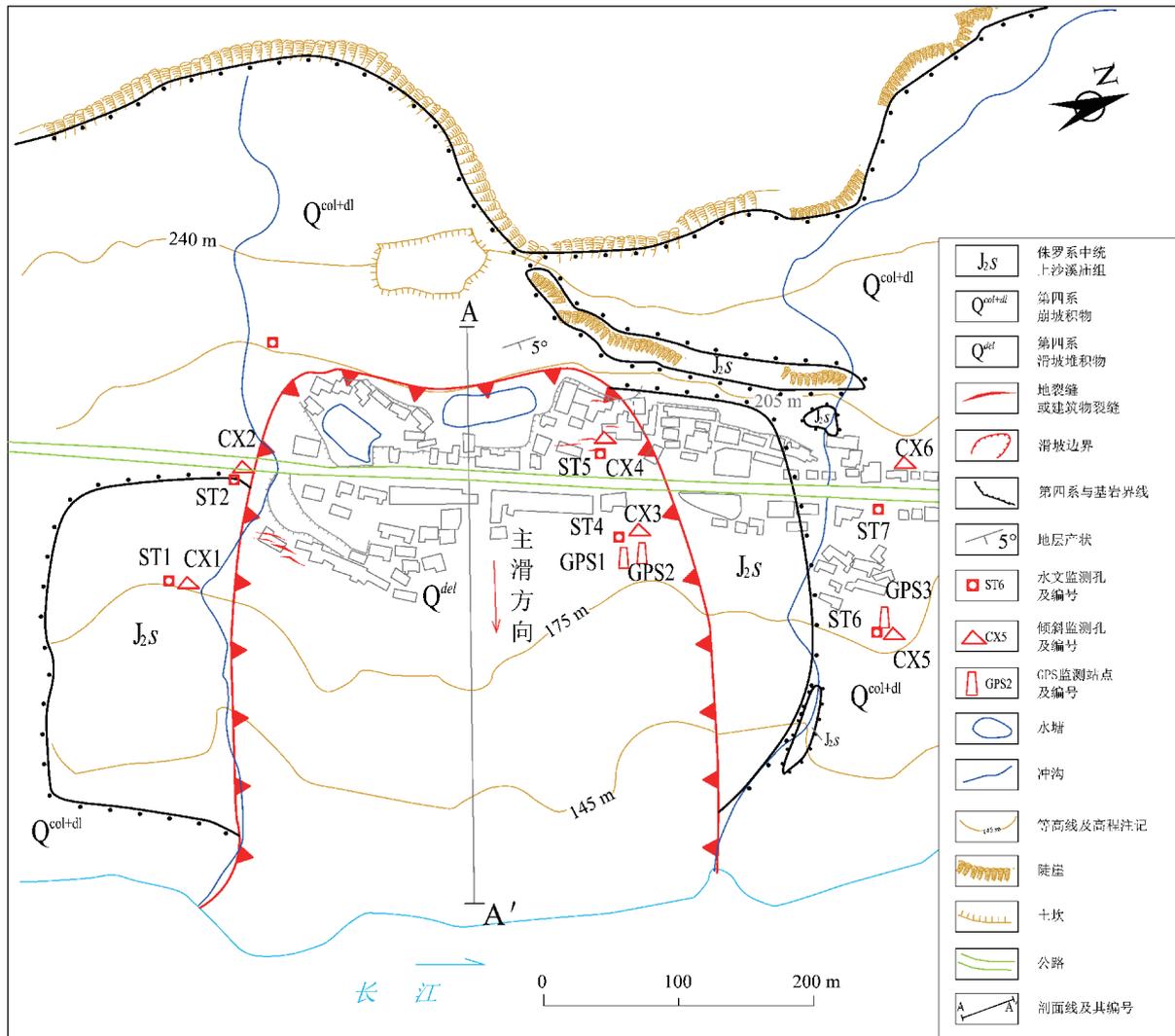


图 2 石龙门滑坡平面图

Fig. 2 Planar graph of Shilongmen landslide

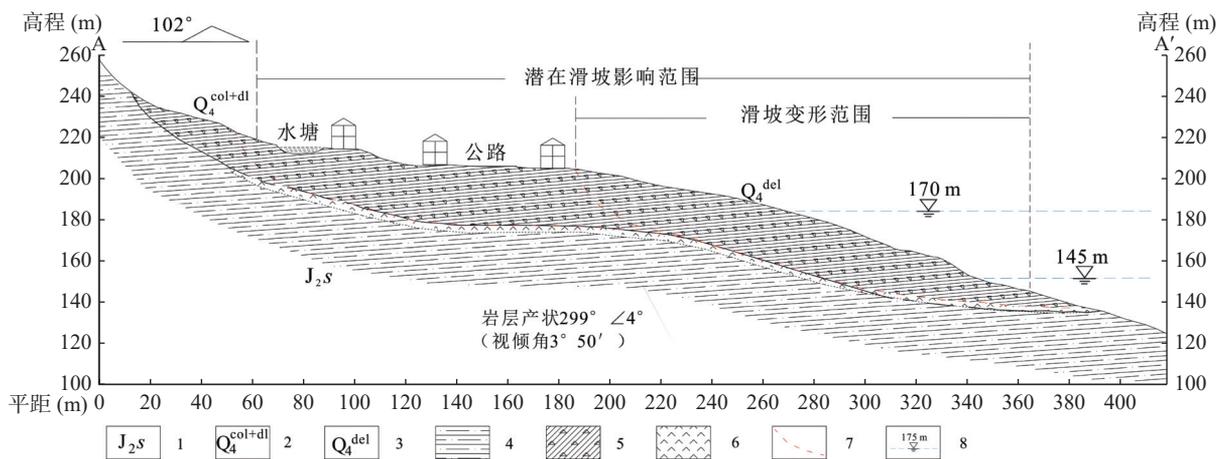


图 3 石龙门滑坡 A-A' 纵剖面图

Fig. 3 A-A' profile graph of Shilongmen landslide

1. 侏罗系中统上沙溪庙组; 2. 崩坡积物; 3. 滑坡堆积物; 4. 粉砂岩及砂岩; 5. 粘土夹碎石;
6. 泥化夹层; 7. 滑动面(潜在); 8. 三峡水库库水位

对滑坡深部位移监测数据进行分析(图5),发现滑坡深部的变形逐年增加,在每年汛期的库水位下降及低水位运营期(4~9月)时段位移出现较小的阶跃现象。分析表明,石龙门滑坡位移阶跃现象主要受库水位变动与降雨的联合作用影响,滑坡平均变形速率约为3~4 mm/月,目前处于蠕滑状态。现场调查及走访得知,滑坡中后部居民房屋修缮后产生了新的裂缝(图6a),前缘观光平台垂直滑动方向的地面裂缝也不断扩大,逐渐贯通(图6b)。

2 滑坡数值模拟设计

2.1 滑坡建模与参数取值

针对复杂水文条件下的堆积层滑坡渗流动态过程,本文使用 Geo-studio 中的渗流分析模块 Seep/W 模拟。根据石龙门滑坡的工程地质特征,选取滑坡主剖面作为模拟计算剖面,建立二维数值模型。数值模型采用 2 m 大小的网格对坡体进行剖分,共得到 13 482 个节点,13 604 个单元(图7)。

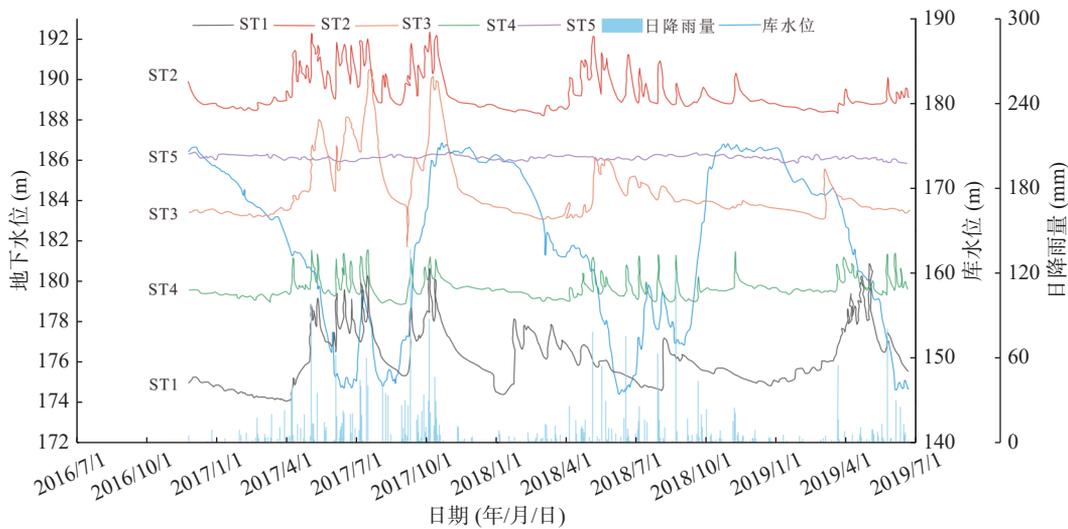


图4 石龙门滑坡区 ST1-ST5 监测孔地下水水位与库水位、日均降雨量关系图

Fig. 4 Relationship among groundwater level at monitoring holes ST1-ST5 in the Shilongmen landslide area, reservoir level and average daily rainfall

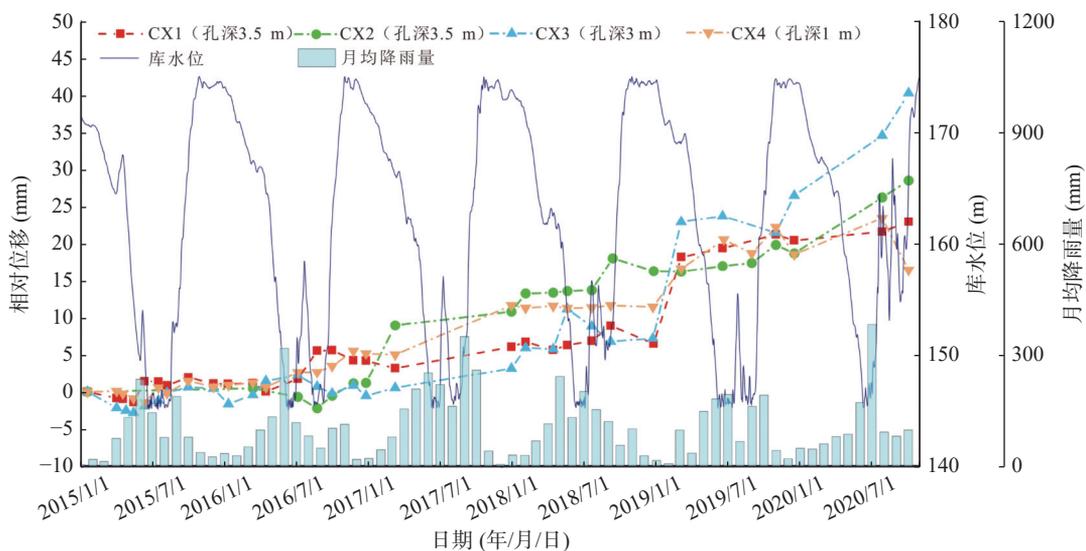


图5 石龙门滑坡区 CX1-CX4 倾斜监测孔相对位移与库水位、月均降雨量关系图

Fig. 5 Relationship among relative displacement of CX1-CX4 inclined monitoring holes in Shilongmen landslide area, reservoir water level and monthly average rainfall



图 6 石龙门滑坡局部变形情况

Fig. 6 Localised deformation of the Shilongmen landslide

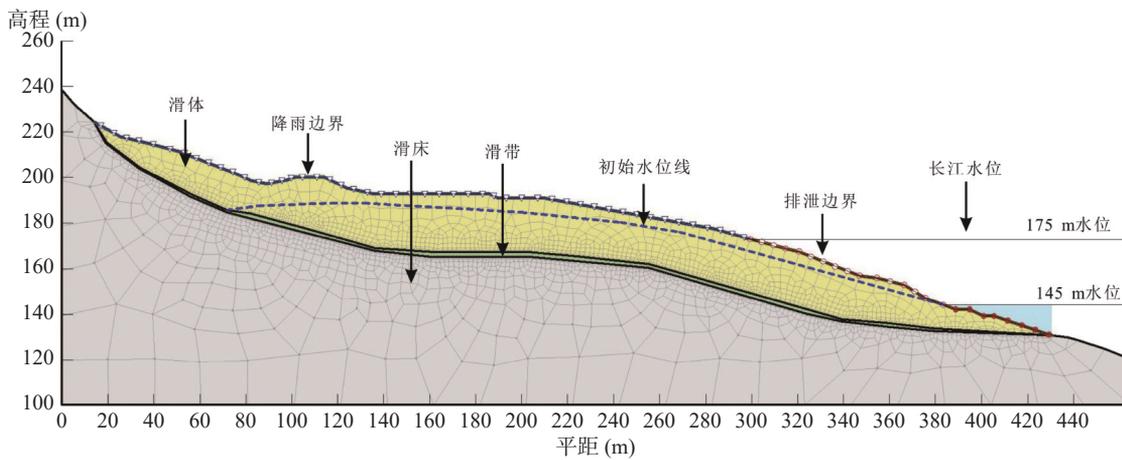


图 7 石龙门滑坡二维数值模型

Fig. 7 Two-dimensional numerical modelling of the Shilongmen landslide

计算过程中涉及滑坡材料的基本物理力学参数包括渗透系数、含水率、抗剪强度、压缩模量、泊松比等。岩土体力学参数以滑坡土工试验数据为基础, 通过综合分析前期滑坡勘察土工试验报告取值(表 1)。其中, 滑床在模拟过程中设置为不透水固定边界, 弹性模量设置为极值, 天然与饱和内摩擦角和粘聚力相同。

由于野外难以获得滑体土饱和渗透系数和体积含水率数据, 本文通过实际条件下的渗流模拟与监测数据进行对比反演。采用穷举法最终确定滑坡的饱和渗透系数和体积含水量, 再通过 Van

Genuchten 经验曲线确定非饱和滑体土的渗透系数和体积含水量。

利用 SEEP/W 模块进行地下水渗流反演, 选取 2018 年 6 月 15 日~2019 年 6 月 15 日完整水文年的库水位、降雨数据作为反演工况。库水位变动共可分为 5 个阶段, 分别模拟 5 个阶段坡体地下水位变动(图 8)。选择 ST1、ST2 地下水位监测数据对数值模拟结果进行对比核对, 通过不断调整模型参数, 获得与实际过程较匹配的饱和渗透系数和体积含水量参数。

图 9 为反演工况下模拟 2019 年 4 月 1 日地

表 1 滑坡岩土体参数取值

Table 1 Parameter value of landslide rock and soil mass

位置	重度(kN·m ⁻³)	弹性模量(Mpa)	泊松比	内摩擦角c(°)		粘聚力φ(kpa)	
				天然	饱和	天然	饱和
滑体	20.1	20	0.3	15.2	13.5	38	29
滑床	30	16000	0.4	38.2		1120	
滑带	21.0	10	0.2	12.9	8.7	27	22

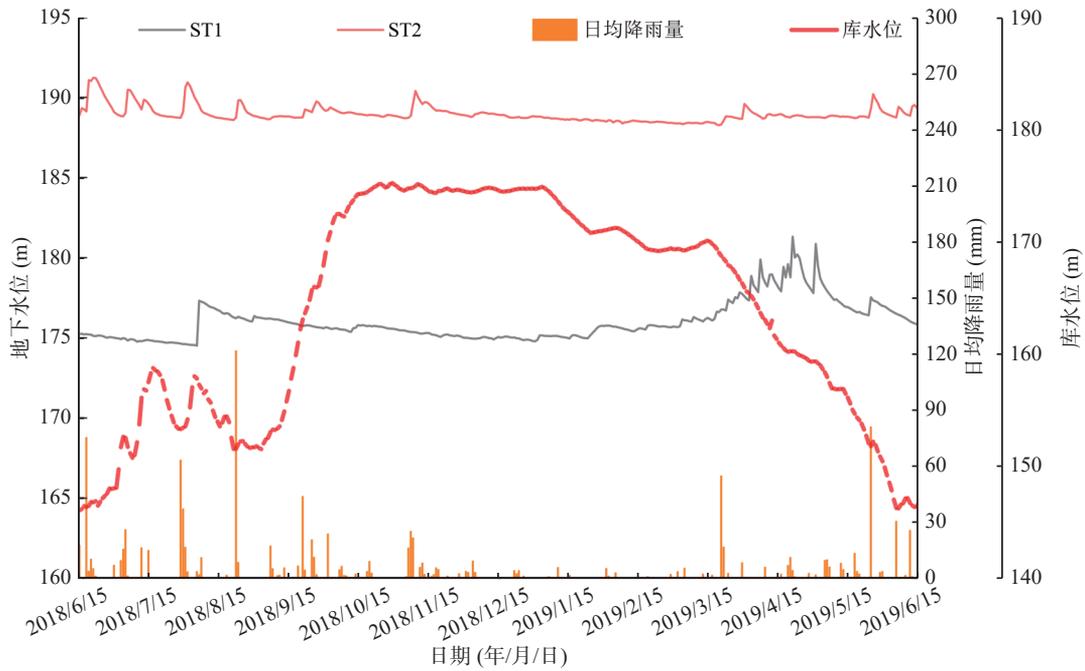


图 8 石龙门滑坡 2018 年 6 月至 2019 年 6 月库水位、日均降雨量与水位监测曲线

Fig. 8 Reservoir level, average daily rainfall and water level monitoring curves for the Shilongmen landslide from June 2018 to June 2019

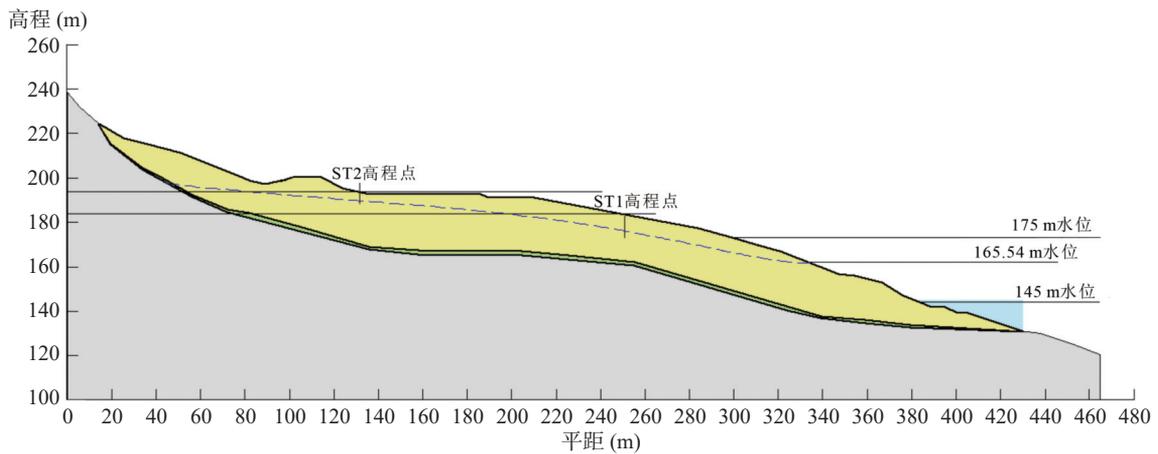


图 9 石龙门滑坡 2019 年 4 月 1 日反演工况地下水水位线

Fig. 9 The groundwater level line under inversion condition for the Shilongmen landslide, on April 1, 2019

下水位分布图。此时库水位为 165.54 m, 模型中 ST1、ST2 孔位高程点水位分别为 177.3 m、189.5 m, 水位监测孔监测当天水位高程为 177.578 m 和 189.5797 m, 此时模型设置的渗透系数和体积含水率符合真实工况。通过反演工况下的滑坡地下水渗流情况, 可获得滑坡滑体土的饱和渗透系数为 0.674 m/d, 饱和体积含水率为 35%。非饱和区土体渗透系数和体积含水率通过 Van Genuchten 经验曲线(图 10)确定。

2.2 模拟工况设计

统计研究区历史滑坡资料, 该地区现发育有滑坡地质灾害 38 处。由于 4~6 月汛期集中降雨作用, 2020 年大周镇新增了地质灾害点 29 处, 可知滑坡事件主要发生在每年的 4~6 月, 因此在降雨工况设计时重点考虑该时期的降雨情况。根据万州区近 50 年来 4~6 月的日降雨量数据, 统计每年最大降雨过程累积降雨量以及所对应的降雨天数(图 11)。采用皮尔逊 III 型函数计算最

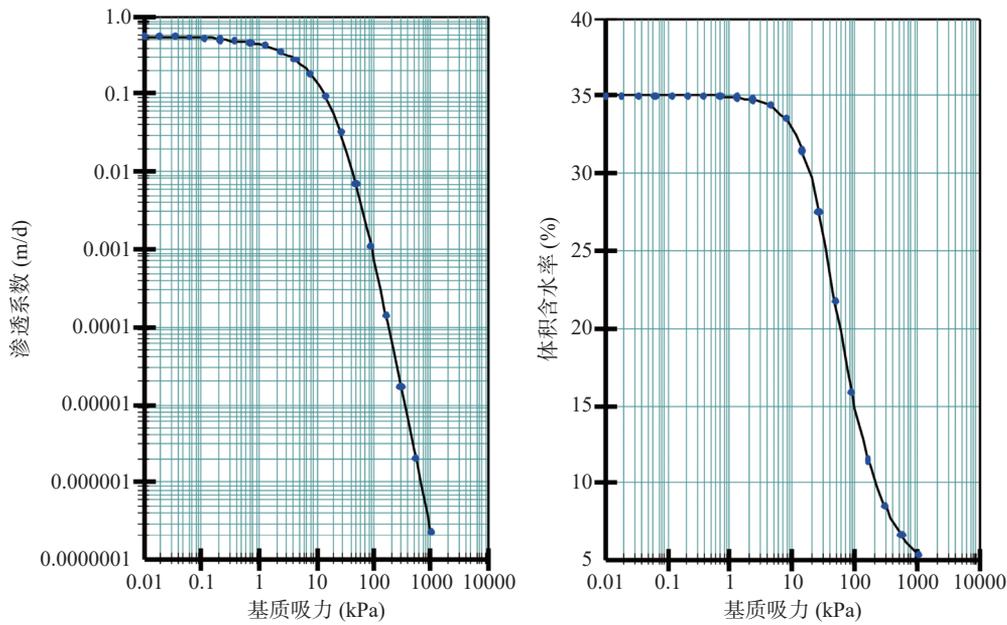


图 10 石龙门滑坡滑体土非饱和区渗透系数及体积含水率变化曲线

Fig. 10 Variation curves of permeability coefficient and volumetric water content in unsaturated zone of landslide soil of Shilongmen landslide

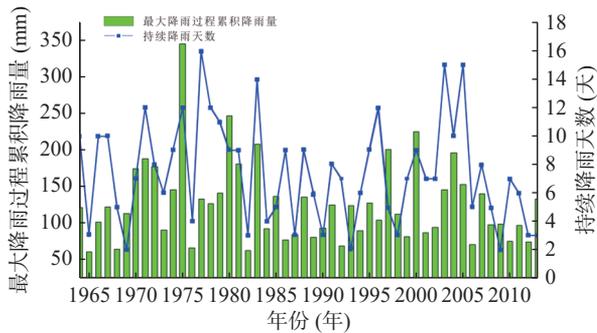


图 11 近 50 年万州区降雨数据统计

Fig. 11 Rainfall statistics of Wanzhou in recent 50 years

大降雨量概率分布,通过皮尔逊频率曲线拟合得到万州区近 50 年 4~6 月最大降雨概率分布曲线图(图 12),考虑到单日降雨极值强度过大,为更好观察降雨对滑坡的影响,将降雨极值按照 3 天降雨进行历时分布,可得到不同重现期的平均降雨强度值(表 2)。

在一个水文年中,三峡水库水位下降约 170 天,上升约 75 天。在夏季洪水爆发期会出现库水位的快速调控,根据三峡库区水位变动数据,单日最大降幅曾达到 2.79 m/d。由于区域降雨的时空分布极不均匀,综合考虑区域降雨及三峡库水位调度情况,设计库水位与不同重现期降雨的组合特征进行研究。库水位升降速率按照三峡库区水

位实际调度情况设计,并增加下降速率 3 m/d 的极端条件;设计降雨重现期为 50 年一遇暴雨和百年一遇暴雨,并将降雨工况设置在库水位升降的中期,以便观察降雨前后对坡体的影响和对比分析。为了探讨在不同水文条件下降雨与库水位分别对滑坡的影响情况,试验共设置了三类水文条件,共计 6 种模拟工况(表 3)。

3 渗流模拟结果分析

3.1 降雨条件下的滑坡渗流特征

工况 1、2 为库水位位于 145 m 低水位时分别叠加 50 年一遇和 100 年一遇暴雨,其中降雨时间设置在第 1~3 天。由图 13、图 14 可知,降雨对滑坡中后部的地下水位以及孔隙水压力有明显影响。随着降雨事件发生,滑坡后缘地下水位出现明显抬升,地下水位线由“上凸型”逐渐转化为“下凹型”,土体孔隙水压力逐渐增大。降雨结束后几天内,坡体后缘水位和孔隙水压力仍处于缓慢上升状态,然后缓慢下降。对比工况 1、2,可发现地下水位与孔隙水压力变化相似,其原因为 50 和 100 年一遇降雨强度超出了坡体表面入渗能力,导致雨水主要以表面径流方式排泄。

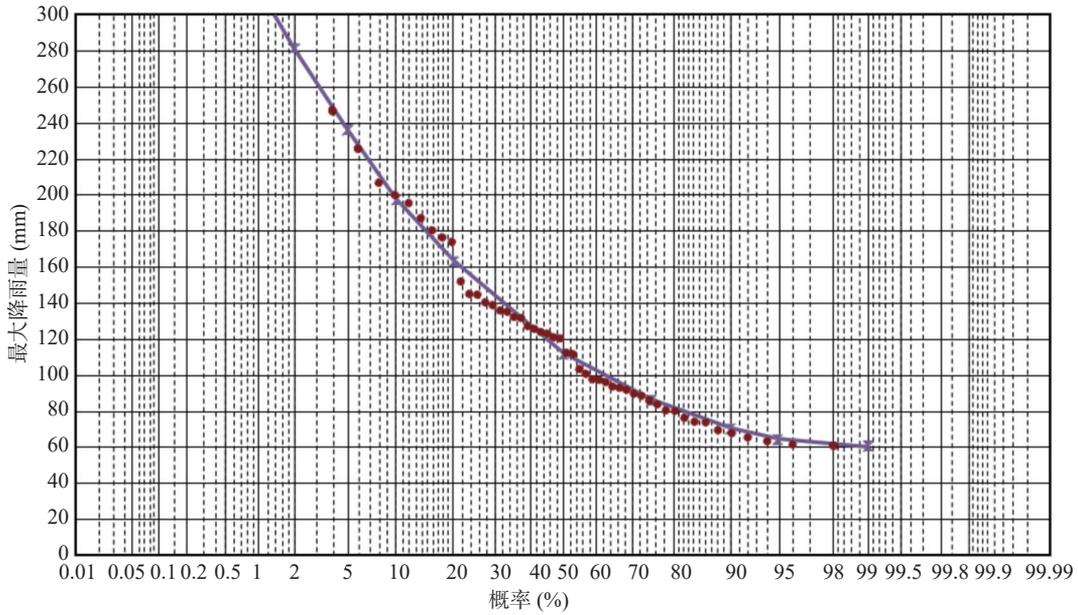


图 12 万州区近 50 年 4~6 月降雨概率曲线

Fig. 12 Rainfall probability curve of Wanzhou from April to June over the past 50 years

表 2 万州区降雨重现期统计表

Table 2 Statistics of rainfall return period in Wanzhou

重现期(a)	5	10	20	50	100
降雨极值(mm)	168.5	199.8	253.2	281.4	320.1
平均降雨强度(mm/d)	56.2	66.6	84.4	93.8	106.7

3.2 库水位变动条件下的滑坡渗流特征

工况 3、4 仅考虑库水位升降对滑坡的影响。库水位升降主要影响滑坡前缘,对滑坡后缘影响不明显。随着库水位上升,滑坡前缘水位线逐渐升高(图 15a),孔隙水压力逐渐增大(图 16a);随着库水位下降,水位线逐渐下降(图 15a),孔隙水压力逐渐减小(图 16a),但滑坡孔隙水压力在前 10 天水位下降过程中有轻微增大,说明库水位下降会使滑坡内部产生渗透压力,后期随着地下水渗流通道贯通,孔隙水压力逐渐减小。

3.3 库水位下降叠加降雨条件下的滑坡渗流特征

工况 5、6 模拟了库水位下降叠加降雨对滑坡的影响,降雨设置在库水位下降的中期。库水位下降引起地下水位下降,对滑坡前缘影响尤为明显。降雨发生后,地下水位稍有升高(图 17a),说明降雨增大了地表水入渗,同时引起了土体孔隙水压力增大(图 18a)。降雨停止后,地下水位先保持不变,随后逐渐下降,但该工况下的水位线始终较工况 4 高,同样引起的孔隙水压力消散过程也越持久。

工况 6 为库水位快速下降(3 m/d)+100 年一遇降雨工况,共模拟 10 天,降雨设置在库水位下降的中期。在库水位快速下降条件下,滑坡后缘地下水位没有下降,反而出现轻微上升,可见库水位快速下降增大了滑坡前缘水头差,而坡体后缘受水塘蓄水和降雨的影响,地下水无法及时向前

表 3 石龙门滑坡数值模拟工况设计

Table 3 Design of numerical simulation conditions for Shilongmen landslide

工况分类	工况编号	工况条件	模拟时间(d)
降雨	工况1	库水位145 m+50年一遇暴雨	10
	工况2	库水位145 m+100年一遇暴雨	10
库水位升降	工况3	库水位从145 m上升到175 m	75
	工况4	库水位从175 m下降到145 m	170
库水位下降 叠加降雨	工况5	库水位从175 m下降到145 m+50年一遇暴雨	170
	工况6	库水位从175 m以3 m/d下降速度下降至145 m+100年一遇暴雨(极端条件)	10

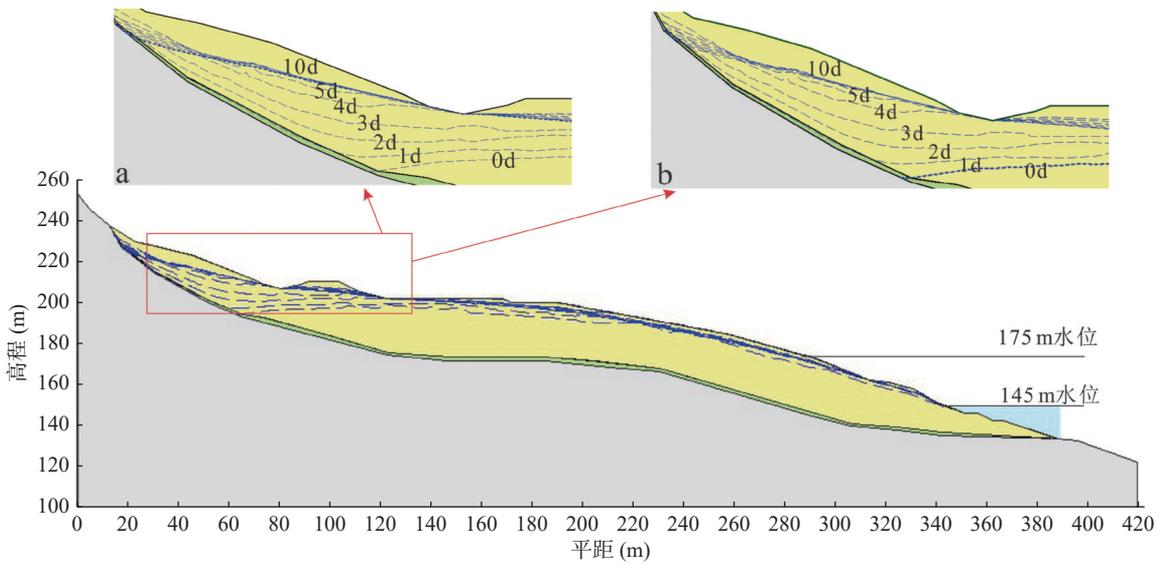


图 13 低水位叠加 50 年 (a)、100 年 (b) 一遇暴雨下的石龙门滑坡地下水位变化情况

Fig. 13 Groundwater level changes in the Shilongmen landslide under low-water superimposed 50-year (a) and 100-year (b) rainstorms

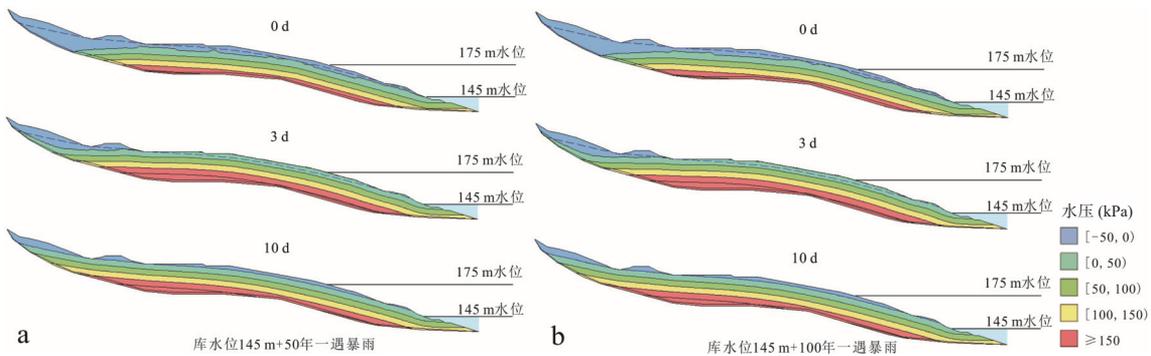


图 14 低水位叠加 50 年 (a)、100 年 (b) 一遇暴雨下的石龙门滑坡孔隙水压力变化情况 (第 0、3、10 天)

Fig. 14 Changes in pore water pressure at the Shilongmen landslide under low water superimposed on a 50-year (a) and 100-year (b) rainstorm (days 0, 3, 10)

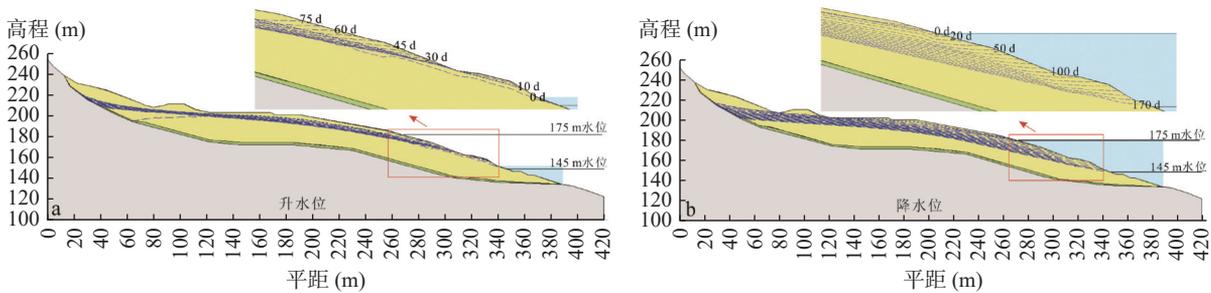


图 15 库水位上升 (a) 和下降 (b) 情况下石龙门滑坡地下水位变化情况

Fig. 15 Changes in groundwater levels in the Shilongmen landslide under rising (a) and falling (b) reservoir levels

入渗排泄并在后缘聚集, 抬高了地下水位(图 17b), 土体间的孔隙水压力也明显上升(图 18b), 对前缘土体具有加载作用, 降雨减小了坡体前缘水头差, 因此坡体后缘地下水位上升速率开始减缓, 在降雨停止后, 库水位的快速下降继续形成动水压力, 土体间孔隙水压力稍有减小。

4 滑坡变形特征及稳定性分析

4.1 滑坡变形模拟

为探讨不同水文条件下坡体的变形特征, 基于 SIGMA/W 变形模块, 并结合坡体渗流过程对

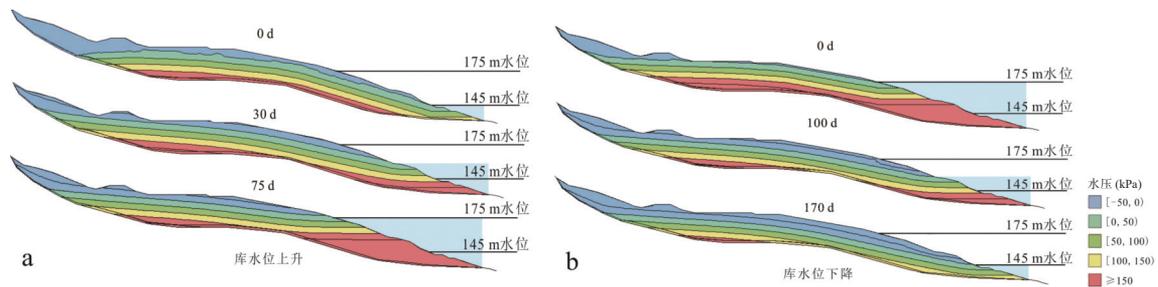


图 16 库水位上升(第 0、30、75 天)(a)和下降(第 0、100、170 天)(b)过程中石龙门滑坡孔隙水压力变化情况

Fig. 16 Changes in pore water pressure in the Shilongmen landslide during the rise (days 0, 30, 75) (a) and fall (days 0, 100, 170) of the reservoir level (b)

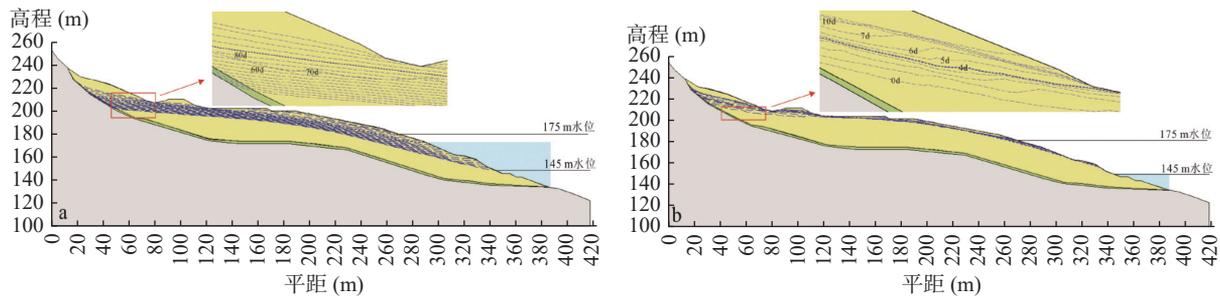


图 17 工况 5 (a)、工况 6 (b) 条件下石龙门滑坡地下水位变化情况

Fig. 17 Changes in groundwater level of Shilongmen landslide under working conditions 5(a) and 6(b)

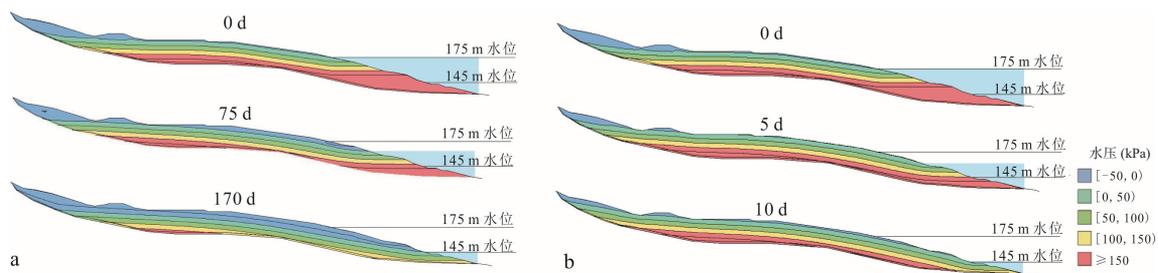


图 18 工况 5 (第 0、75、170 天)(a)、工况 6 (第 0、5、10 天)(b) 条件下石龙门滑坡孔隙水压力变化情况

Fig. 18 Variation of pore water pressure in Shilongmen landslide under working condition 5 (days 0, 75, 170) (a) and working condition 6 (days 0, 5, 10) (b)

坡体的变形特征进行模拟研究。

滑坡的变形模拟主要分析坡体的位移变化特征和应力分布特征,得到不同工况条件下石龙门滑坡水平位移变化特征如图 19 所示。各工况条件下滑坡变形主要产生于库水位波动区域和滑坡后缘平台,变形量在 0~0.18 m 之间,且地表位移大于深部位移,其中极端条件(工况 6)下坡体变形量最为明显,库水位上升条件(工况 3)下坡体变形最为轻微。变形集中于前缘和滑坡后缘平台的原因主要为滑体为亲水性强、抗剪强度低的粉质黏土,在库水位与降雨共同作用下易发生崩解软化,从而发生变形;同时后缘平台易积蓄大量雨

水和地下水,导致土体重度、孔隙水压力增大而引起变形。

对比工况 3、4 可知,库水位下降引起的坡体前缘变形明显大于库水位上升引起的坡体变形(图 19)。结合坡体渗流分析可知,库水位下降引起土体间基质吸力增大,孔隙水压力减小,同时坡体内外水头差产生的动水压力导致土体下滑力增加,坡体位移量增大。

对比工况 1、4、5 可知,在库水位变动条件下,坡体变形大于库水位静止状态,同时库水位下降叠加降雨变形最为明显(图 19)。在降雨产生的渗透力和库水位下降增大的动水压力双重作用

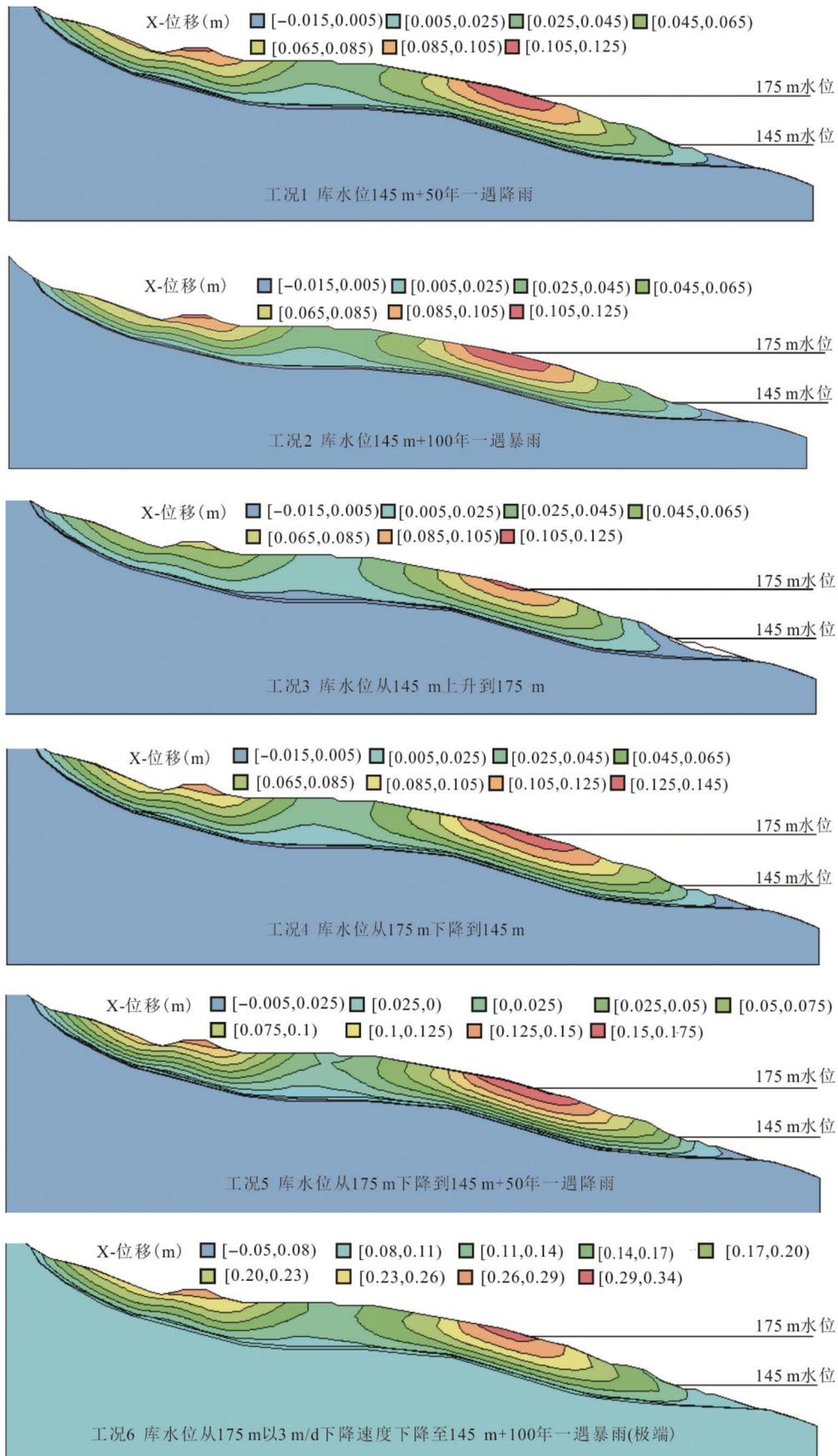


图 19 不同工况下石龙门滑坡水平位移特征

Fig. 19 Horizontal displacement characteristics of Shilongmen landslide under different working conditions

下,坡体前缘变形幅度显著增加。库水位波动对坡体后缘影响较小,因此坡体后缘发生的轻微变形主要是由降雨所引起。

在极端条件(工况6)下,仅模拟坡体10天变形量,坡体前缘库水位波动区域产生位移已达0.29~0.34 m(图19)。由此可见,库水位快速下降叠加极端降雨引起的坡体变形速率最大,对坡体稳定性会产生不利影响。

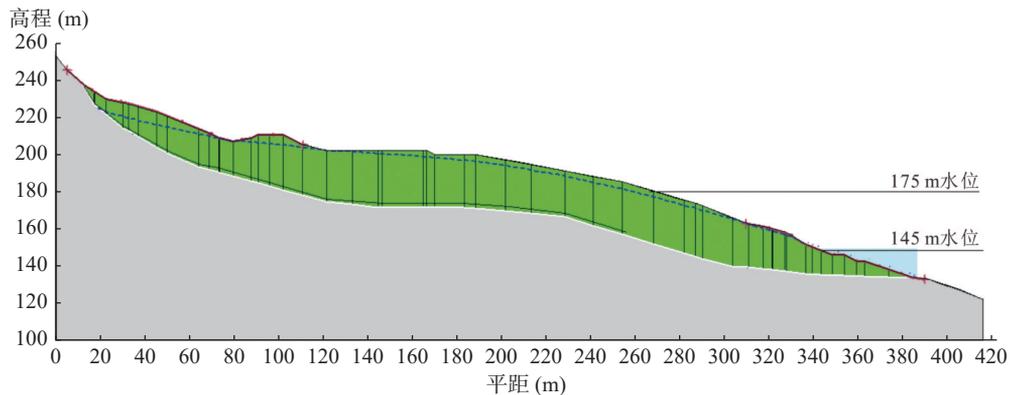


图20 石龙门滑坡稳定性计算模型

Fig. 20 Stability calculation model for Shilongmen landslide

表4 石龙门滑坡稳定性系数变化统计表

Table 4 Statistical table of changes in stability coefficients of the Shilongmen landslide

工况条件	工况编号	稳定性系数			变幅(%)
		初始值	最小值	最终值	
静止水位+暴雨	工况1	1.202	1.065	1.181	11.4
	工况2	1.202	1.059	1.137	11.9
水位涨落	工况3	1.202	1.202	1.227	2.1
	工况4	1.271	1.257	1.257	1.0
库水位下降+降雨	工况5	1.271	1.028	1.028	19.1
	工况6	1.271	0.932	0.932	26.6

由表4可知,滑坡在175 m高水位时初始稳定性系数为1.271,145 m低水位时初始稳定性系数为1.202,可见高水位有利于坡体的稳定性,主要原因是高水位产生的浮托力减小了下滑力,使得坡体稳定性增加。

对比工况3、4可知,库水位抬升有利于滑坡稳定性,库水位下降,滑坡稳定性降低。库水位上升虽然增大了坡体的自重,但是减小了渗透压力,同时前缘静水压力增大有一定的阻滑效果,因此稳定性有所增大。库水位下降增大了坡体内部水

4.2 滑坡稳定性分析

在库水涨落和降雨条件下,基于滑坡渗流模型建立滑坡稳定性计算模型,在Geo-Studio软件中选取SLOPE/W稳定计算模块开展模拟。如图20为建立的石龙门滑坡稳定性计算模型,系统依据地形自动计算滑体形态,共计划分54个条块。各工况条件下滑坡临界滑移面的稳定性系数变化见表4。

力梯度,产生的渗透压力增大,同时前缘静水压力减小,因此滑坡稳定性降低。

对比工况4、5可知,在库水位下降叠加降雨工况条件下,滑坡稳定性大幅降低,滑坡由稳定状态发展为欠稳定状态。计算极端条件下(工况6)每天滑坡的稳定性系数,发现滑坡稳定性由1.271降低到0.932,处于失稳状态,并在第4天后稳定性大幅降低(图21)。尽管当前三峡库区没有出

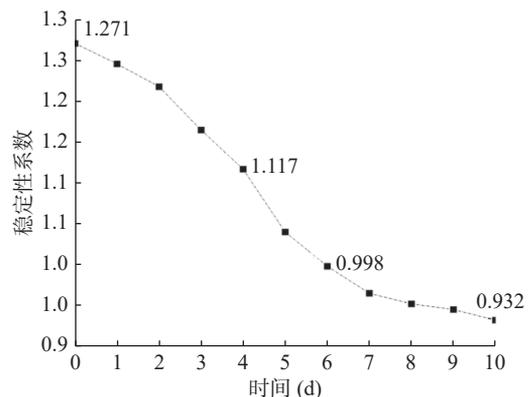


图21 极端条件(工况6)下石龙门滑坡稳定性系数变化趋势

Fig. 21 Trend of stability coefficient of Shilongmen landslide under extreme conditions (working condition 6)

现过类似的极端工况,但随着极端天气事件越来越频发,未来可能会有滑坡因此产生失稳破坏。所以,应当加强对三峡库区涉水堆积层滑坡的监测预警,以期保障人民的生命财产安全。

5 结论

通过对石龙门滑坡长期监测数据分析及有限元数值模拟,得出如下结论:

(1)降雨和库水位下降的联合作用是石龙门滑坡的主要诱发因素,降雨以冲刷作用和渗透作用为主,库水位下降则主要引起动水压力作用,在降雨耦合库水位下降条件下滑坡变形机制呈现出动水压力型的特点。

(2)降雨和库水位主要影响位置不同。降雨作用显著引起滑坡后缘地下水位和孔隙水压力明显升高,导致坡体前缘承受的土体压力增大,变形增加;而库水作用段为滑坡前缘,水位下降时增大了坡体内水力梯度,产生动水压力而引发坡体变形。在库水位下降联合降雨条件下,滑坡由稳定状态发展为欠稳定状态,并且随着降雨强度和库水位下降速率增加,稳定性降低。

参考文献:

賁琰棋,易武,黄晓虎,魏兆亨,肖宇煌,邓欣雨.2023.基于有效降雨量的“阶跃型”滑坡递进式预警模型研究[J].华南地质,39(3):492-501.

常宏.2023.三峡库区堆积体复活失稳的宏观判据初探[J].华南地质,39(3):428-444.

常宏.2024.三峡库区今后仍需重点关注的滑坡崩塌成灾模式[J].华南地质,40(4):725-736.

陈慧娟,邹浩,阎遥,王超,毛帅.2023.持续强降雨影响下黄梅县袁山村三组滑坡破坏特征与成因分析[J].华南地质,39(3):482-491.

代贞伟,李滨,陈云霞,冯振,赵瑞欣,贺凯,高杨.2016.三峡大树场镇堆积层滑坡暴雨失稳机理研究[J].水文地质工程地质,43(1):149-156.

高晨曦,石长柏,闫巍,侯时平,唐玄,安知利,路永强.2024.堆积层滑坡在库水位变动与降雨共同作用下的阈值研究——以墓坪滑坡为例[J].资源环境与工程,38(1):73-82.

高文军,丛凯,杜全云.2021.强降雨条件下堆积层滑坡入渗规律及稳定性分析[J].甘肃科学学报,33(1):101-105.

黄达,顾东明,陈智强,朱宏,陈赐金.2017.三峡库区塔坪H2古滑坡台阶状复活变形的库水-降雨耦合作用机制[J].岩土工程学报,39(12):2203-2211.

江强强,焦玉勇,宋亮,王浩,谢壁婷.2019.降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J].岩土力学,40(11):4361-4370.

抗兴培,孟凡成,曾超,王彪龙,郭将,刘晓.2019.强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J].中外公路,39(3):34-39.

李卓,何勇军,盛金保,李宏恩,李铮,杨阳.2017.降雨与库水位共同作用下近坝库岸边坡滑坡模型试验研究[J].岩土工程学报,39(3):452-459.

梁宇,严磊,苏培东,邱鹏,龙伟,汪意凌.2021.溪洛渡库区河口滑坡变形特征和形成机制[J].科学技术与工程,21(34):14500-14507.

刘才华,陈从新,冯夏庭.2005.库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J].岩土力学,26(5):769-773.

罗世林,刘华亮,蒋建清.2024.库水—降雨作用下靠椅状基覆面堆积层滑坡响应机理[J].清华大学学报(自然科学版),64(8):1336-1346.

王鲁男,晏鄂川,陆文博,柳万里.2016.库水变动下堆积层滑坡加卸载响应规律与稳定性预测[J].工程地质学报,24(6):1048-1055.

吴火珍,冯美果,焦玉勇,李海波.2010.降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J].岩土力学,31(S1):324-329.

许强,黄润秋.1995.用加卸载响应比理论探讨斜坡失稳前兆[J].中国地质灾害与防治学报,6(2):25-30.

许艺林,李远耀,李思德,石浩.2024.库水位下降叠加降雨作用时堆积层滑坡渗流-变形机制[J].地质科技通报,43(1):216-228.

杨诗诗,叶润青,付小林,吴润泽,熊能,文天龙.2023.三峡库区降雨型滑坡预警雨量阈值研究[J].华南地质,39(3):445-454.

叶润青,付小林,郭飞,易庆林,张俊义,李长明,侯时平,刘娜.2021.三峡水库运行期地质灾害变形特征及机制分析[J].工程地质学报,29(3):680-692.

殷跃平,张晨阳,闫慧,肖明友,侯雪峰,朱赛楠,黄波林,代贞伟,张楠.2022.三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究[J].岩石力学与工程学报,41(4):649-659.

张群,许强,甯娜.2014.降雨条件下低缓浅层土质滑坡稳定性影响因素及耦合研究[J].水文地质工程地

- 质,41(5):90-94+117.
- 张桂荣,程伟.2011.降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J].岩土力学,32(S1):476-482.
- 周永强,盛谦.2014.库水位变化和降雨作用下付家坪子高陡滑坡稳定性研究[J].长江科学院院报,31(2):57-61+67.
- 朱元甲,贺拿,钟卫,孔纪名.2020.间歇型降雨对堆积层斜坡变形破坏的物理模拟研究[J].岩土力学,41(12):4035-4044.
- 邹祖银,朱占元,张锋,陈婷婷,张自兴.2016.连续降雨条件下某震后高边坡稳定性分析[J].地震工程学报,38(4):541-548.
- Alonso E, Gens A, Lioret A, Delahaye C H. 1995. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[J]. Unsaturated Soils, (1): 241-249.
- Coe J A, Ellis W L, Godt J W, Savage W Z, Savage J E, Michael J A, Kibler J D, Powers P S, Lidke D J, Debray S. 2003. Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998-March 2002[J]. Engineering Geology, 68(1-2): 67-101.
- Iadanza C, Trigila A, Napolitano F. 2016. Identification and characterization of rainfall events responsible for triggering of debris flows and shallow landslides[J]. Journal of Hydrology, 541: 230-245.
- Pang G X, Qiang Y. 2016. Formation Mechanism and Stability Analysis of Typical Accumulation landslide in the Three Gorges Reservoir[C]. International Conference On Smart City and Systems Engineering, 50-53.