

考虑库水升降和滑带弱化作用的岸坡启滑机制分析

王林峰, 夏万春, 冉 捷, 张继旭, 程 平

Analysis on the mechanism of bank slope sliding considering the effect of reservoir water fluctuation and sliding zone weakening

WANG Linfeng, XIA Wanchun, RAN Jian, ZHANG Jixu, and CHENG Ping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

季节性冻土区滑坡防治工程的冻融效应分析

Analysis on the effect of freeze-thaw on landslide prevention projects in seasonal frozen soil area

杨栋, 王全成, 姜昭群 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 82-89

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

基于虚拟参考站技术的滑坡高精度位移监测系统设计与实践

Design and practice of high precision landslide displacement monitoring system based on VRS

张鸣之, 湛兵, 赵文, 袁旭东, 李宏祥 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 54-59

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202204009

王林峰, 夏万春, 冉捷, 等. 考虑库水升降和滑带弱化作用的岸坡启滑机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 30-41.
WANG Linfeng, XIA Wanchun, RAN Jian, et al. Analysis on the mechanism of bank slope sliding considering the effect of reservoir water fluctuation and sliding zone weakening[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 30-41.

考虑库水升降和滑带弱化作用的岸坡启滑机制分析

王林峰¹, 夏万春¹, 冉捷¹, 张继旭¹, 程平²

- (1. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校市级重点实验室, 重庆 400074;
2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要:以三峡库区凉水井滑坡为研究对象, 采用理论分析与数值模拟的研究手段, 构建了滑带强度弱化模型, 提出了渗流驱动的滑坡启滑判据, 应用Geo-studio有限元程序分析了库水不同升降速率对滑坡稳定性的影响, 揭示了库水升降作用下岸坡渗流场演变规律和渗流驱动下的启滑机制。研究表明: (1) 渗透压力与渗透时间的变化是滑带土强度弱化的关键因素, 弱化到临界强度时, 在渗流驱动下发生压剪破坏而启滑, 由局部向整体以渐进模式破坏失稳; (2) 库水升降过程中, 坡体内孔隙水压力滞后性较明显, 水位升降速率会影响坡体地下水响应时程, 升降速率越大, 孔隙水压力变化越大, 渗流驱动力越大, 滑坡稳定性变化越快, 越趋近于渐进破坏; (3) 库水位从 175 m 降到 145 m, 凉水井滑坡滑面法向应力最大降低了 38.19%, 剪应力最大降低了 22.20%, 有效法向应力最大落差为 168.64 kPa, 抗剪强度最大落差为 63.45 kPa。以上分析结论与规律可为涉水滑坡启滑机制分析、库岸山体滑坡失稳研究及应急防治工程提供科学依据和理论方法。

关键词: 滑坡; 库水升降; 启滑判据; 渗流稳定性; Geo-studio; 三峡库区

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)02-0030-12

Analysis on the mechanism of bank slope sliding considering the effect of reservoir water fluctuation and sliding zone weakening

WANG Linfeng¹, XIA Wanchun¹, RAN Jian¹, ZHANG Jixu¹, CHENG Ping²

- (1. Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: This study focuses on the Liangshuijing landslide in the Three Gorges Reservoir area, using theoretical analysis and numerical simulations methods to construct a strength weakening model for the sliding zone and proposes a criterion for seepage-driven landslide initiation. The influence of different water level rise and fall rates on landslide stability is analyzed using the finite element program Geo-Studio, and the evolution laws of bank slope seepage field under the rise and fall of reservoir water and the starting and sliding mechanism caused by seepage are revealed. The research finds that changes in seepage pressure and time are crucial in weakening the strength of sliding zone soil. Once it reaches the critical strength, seepage causes pressure shear failure, leading to the initiation of the landslide, which progresses from local to overall failure. During the reservoir water level rise and fall process, the hysteresis of pore water pressure in the slope body is evident, and the rate of water level change affects the response time of groundwater in the slope. A faster rate of water level change leads to a

收稿日期: 2022-04-11; 修订日期: 2022-07-18

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxmX0218)

第一作者: 王林峰(1983-), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害减灾理论与技术工作。E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn

通讯作者: 夏万春(1997-), 男, 贵州瓮安人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程病害机理等方面的研究。E-mail: xiawanchun@outlook.com

greater change in pore water pressure, more driving force from seepage, and a faster change in landslide stability and a closer approach to progressive failure. When the reservoir water level drops from 175 m to 145 m, the normal stress on the sliding surface of the Liangshuijing landslide decreases by 38.19%, and the shear stress decreases by 22.20%. The maximum decrease in the effective normal stress is 168.64 kPa and the maximum decrease in shear strength is 63.45 kPa. The above findings provide a scientific basis and theoretical methods for the analysis of landslide initiation and sliding mechanisms, instability research of reservoir bank landslides, and emergency prevention and control engineering.

Keywords: landslide; rise and fall of reservoir water; start slip criterion; seepage stability; Geo-studio; the Three Gorges Reservoir

0 引言

滑带作为滑坡的重要结构要素,其强度变化对滑坡稳定性评价具有控制性影响。国内外有不少中大型水库岸坡因库水波动及滑带强度弱化而引起坡体变形及滑塌失稳,如三门峡水库、凤滩水库、二滩水库及意大利瓦依昂水库等。库水位升降作用导致的滑带强度弱化和产生的渗流驱动力对滑坡稳定性影响不容忽视,而如何量化分析渗流稳定性并提出精确的启滑判据成为库岸滑坡亟待解决的问题。在动水作用下,滑坡体渗流场变化、滑带强度弱化机制较复杂,给库区重大涉水滑坡的失稳预测预报带来了巨大挑战。因此,开展库水升降和滑带弱化作用下岸坡渗流场演变规律及启滑机制等问题的研究迫在眉睫,可为库区涉水滑坡灾害预测预报及工程建设提供可靠的科学依据和理论方法。

近年来,国内外诸多学者对降雨、水位升降及地下水等作用下的滑坡失稳机制开展了一系列的研究。谭淋耘等^[1]分析了滑坡变形在库水位 7 个不同变化过程中的响应特征和诱发机制。肖捷夫等^[2]制作了大型物理试验模型,分别模拟库水涨落和降雨工况,以及两者联合作用的工况,通过试验获得了坡体位移、孔隙水压力和土压力全时程曲线以及滑坡演化数字影像资料。李跃等^[3]以澜沧江流域大华桥水电站大华滑坡为例,针对其滑带土开展了土-水特征曲线试验,分析了非饱和渗透过程的特性及演化规律。He 等^[4]以三峡库区某典型滑坡为研究对象,建立滑坡模型,研究了水位波动对滑坡的影响。Tu 等^[5]采用基于有限元方法的模型,考虑入渗过程和滑坡稳定性,研究了该滑坡在水渗透作用下的活化作用。Cao 等^[6]对排土场滑坡的触发启滑机制和动力过程进行分析评价,得知滑体抗剪强度与排土场土体的含水量、孔隙压力和级配关系密切。Chen 等^[7]研究了滑坡启动阶段抗剪强度的衰减动力分布机理,推导了边坡的动、静平衡统一表达式,提出了用抗剪强度折减法计算稳定系数的方法。而滑坡稳定性主要受滑

带土和软弱面强度的控制^[8],滑带土强度参数的选取直接影响到边坡的稳定性分析和防护设计。Gao 等^[9]提出了一种基于滑动带的土质边坡稳定性分析方法,并通过实例验证了新方法的有效性。Zhu 等^[10]通过一系列直剪蠕变试验,研究了红层滑动土在不同竖向荷载和含水率条件下的蠕变特性。Liu 等^[11]对原状滑带土的残余强度进行了研究,并进行了残余状态蠕变试验,选取不同的恒蠕变应力与残余强度之比,研究了恒蠕变应力与蠕变速率的关系,试图对滑体稳定进行预测。而 Liao 等^[12]认为强度参数的弱化规律可以用指数函数模型来描述和表征,并在考虑不同干湿循环次数的情况下,利用不平衡推力法和可靠度理论对浅、深滑动面的长期可靠度进行了定量分析。Zhao 等^[13]研究了强降雨条件下不同因素对边坡稳定性的影响程度,结合数理统计方法,采用 Geo-studio 软件中 Seep/W 和 Slope/W 模块,耦合计算了边坡稳定系数。

当前研究大多数探讨分析了降雨及库水位波动下滑坡体的稳定性,对滑坡变形、水位变化及降雨等参数之间的相互影响关系及演变规律有了初步的认识,但对于其定量分析相对较少,对于滑带弱化机理及启滑判据的研究更为少见。鉴于以上,针对库水升降和滑带弱化作用下岸坡启滑机制与渗流稳定性问题,本文以三峡库区凉水井滑坡为研究对象,采用理论分析与数值模拟的研究手段,构建了滑带强度弱化模型、提出了渗流驱动的滑坡启滑判据,应用有限元程序分析了库水不同升降速率对滑坡稳定性的影响,查明了库水升降作用下滑坡渗流场演变规律,进而揭示了滑坡在渗流驱动下的启滑机制,为开展类似滑坡研究和工程防治提供了参考依据。

1 滑坡启滑机制理论分析

1.1 滑带强度弱化模型

滑带作为控制滑坡稳定性的关键区域,其强度在滑坡体中最为薄弱,在三峡库区长时间的低水位疏干和高

水位浸泡的干湿循环作用过程中, 滑带土体抗剪强度及其他力学性质均有不同程度的弱化效应, 而这些参数的弱化将影响滑坡整体稳定性。库水升降条件下水对滑带土体的弱化作用可分为软化作用和劣化作用^[14], 软化作用与渗透压本身无直接关系, 而劣化作用可以直接破坏土体结构致使强度劣化, 其与渗透压直接相关。弱化过程中存在一个与渗透压(P)、渗透时间(t)有关的弱化变量 $D_{P,t}$, 其定义为:

$$D_{P,t} = \frac{\tau_0 - \Delta\tau}{\tau_0} = \frac{\tau_{P,t}}{\tau_0} \quad (1)$$

式中: $D_{P,t}$ ——弱化变量;

τ_0 ——滑带土体初始抗剪强度/kPa;

$\Delta\tau$ ——抗剪强度差, $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_{P,t}$;

$\tau_{P,t}$ ——渗透压 P 、渗透时间 t 下土体抗剪强度/kPa。

根据文献^[14]分析, 由于软化作用和劣化作用, 弱化变量 $D_{P,t}$ 可用软化参数和劣化参数表征, 软化参数只与渗透时间 t 有关, 表示为 χ_t 。劣化参数与渗透压 P 、渗透时间 t 有关, 表示为 $\omega_{P,t}$ 。即:

$$D_{P,t} = \chi_t \omega_{P,t} \quad (2)$$

$$\chi_t = \frac{\tau_{0,t}}{\tau_0} \quad (3)$$

$$\omega_{P,t} = \frac{\tau_{P,t}}{\tau_{0,t}} \quad (4)$$

式中: $D_{P,t}$ ——弱化变量;

χ_t ——转化参数;

$\omega_{P,t}$ ——劣化参数;

$\tau_{0,t}$ ——渗透压 0 kPa、渗透时间 t 下土体抗剪强度/kPa;

$\tau_{P,t}$ ——渗透压 P 、渗透时间 t 下土体抗剪强度/kPa。

结合式(3)(4)可得:

$$\tau_{P,t} = \tau_0 \chi_t \omega_{P,t} \quad (5)$$

1.2 渗流驱动启滑模型

库水位上涨时, 坡体内会形成指向坡内的渗流场, 渗流力指向坡内, 具有提升坡体阻滑力的作用。库水位下降时, 坡体前缘水头迅速降低, 使坡体前缘和后缘形成水头差, 坡体承受向外的渗流力。随着库水升降作用对滑坡土体的逐渐弱化, 坡体前缘土体沉降变形, 后缘发展张拉等类型裂缝, 在渗流驱动作用下滑带土体发生压剪破坏而启滑, 最终导致坡体渐进破坏失稳。

对于渗流驱动的滑坡压剪破坏理论分析模型如图 1 所示, 图中 h_1 、 h_2 分别为初水位、终水位, α 为滑坡滑面与水平的平均夹角, L 为渗流路径水平投影长

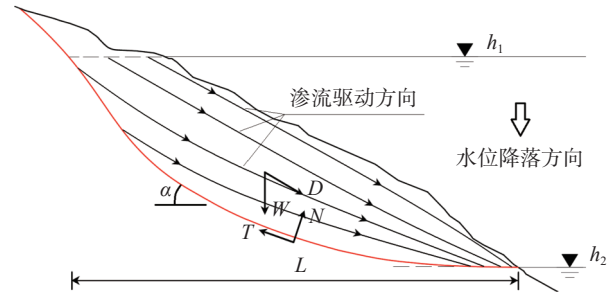


图 1 渗流驱动的滑坡压剪破坏分析模型

Fig. 1 Analysis model for seepage-driven landslides under pressure shear failure

度, 由 Dupuit 公式^[15]可得渗流区域岸坡任一截面单宽流量 q_x 为:

$$q_x = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} \quad (6)$$

由达西定律知:

$$q_x = kJA = kJ(h_x - b_x) \quad (7)$$

因此:

$$q_x = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L} = kJ(h_x - b_x) \quad (8)$$

可得任一截面水力梯度为:

$$J = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L(h_x - b_x)} \quad (9)$$

则任一截面渗流力为:

$$D_p = \rho g J = \frac{\rho g (h_1^2 - h_2^2)}{2L(h_x - b_x)} \quad (10)$$

进而可得考虑库水位降落速度(v_s)、降落时间、库水位初始高度(h_1)、浸润线方程(h_x)以及岸坡滑面方程(b_x)的渗流总驱动力为^[16]:

$$D = \int_0^L D_p dx = \int_0^L \frac{\rho g (2v_s h_1 t - v_s^2 t^2)}{2L(h_x - b_x)} dx \quad (11)$$

式中: D ——渗流总驱动力/kN;

q_x ——任一截面单宽流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

k ——坡体渗透系数;

h_1 、 h_2 ——初水位、终水位/ m;

L ——渗流路径水平投影长度/ m;

J ——任一截面水力梯度;

A ——垂直渗流方向的流经面积/ m^2 ;

v_s ——库水位降落速度/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

h_x ——浸润线方程;

b_x ——滑面关于 x 的函数。

根据传递系数法, 在考虑重力、渗流驱动下滑带弱

化后坡体压剪启滑判据为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \quad (12)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + D_i \cos (\beta_i - \alpha_i) \quad (13)$$

$$D_i = \gamma_w l_i h_w \cos \alpha_i \sin \beta_i \quad (14)$$

$$R_i = [W_i \cos \alpha_i + D_i \sin (\beta_i - \alpha_i)] \tan \varphi_i + c_i l_i \quad (15)$$

$$\psi_j = \cos (\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin (\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \quad (16)$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \psi_{i+2} \psi_{i+3} \cdots \psi_{n-1} \quad (17)$$

式中: F_s ——稳定性系数;

R_i ——第 i 条块的抗滑力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

T_i ——第 i 条块下滑力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

ψ_j ——第 i 条块剩余下滑力传递至 $i+1$ 块段时的传递系数($j=i$ 时);

R_n ——第 n 条块的抗滑力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

T_n ——第 n 条块下滑力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

W_i ——第 i 条块的有效重量/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$), 水位线以上取天然重度, 水位线以下取浮重度;

D_i ——第 i 条块的动水压力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$);

α_i ——第 i 条块滑面倾角/($^\circ$);

β_i ——第 i 块地下水位线平均倾角/($^\circ$);

γ_w ——水的重度, 取 10 kN/m^3 ;

l_i ——第 i 条块滑面长度/m;

h_w ——第 i 条块在水位面以下、库水位面以上范围内的高度/m;

φ_i ——第 i 条块滑面内摩擦角标准值/($^\circ$);

c_i ——第 i 条块的滑面黏聚力/kPa;

根据式(12), 当 $F_s < 1$ 时, 滑坡体在渗流驱动作用下发生压剪破坏而启滑; 当 $F_s = 1$ 时, 滑坡体处于临界状态; 当 $F_s > 1$ 时, 滑坡体处于稳定状态。

2 凉水井滑坡启滑机制验证

2.1 滑坡概况

凉水井滑坡位于重庆市云阳县水让村 8 组三峡库区段长江右岸的斜坡地带, 滑坡整体平面形态呈“U”形, 后部地形呈近似圈椅状, 南高北低, 中后部地形较陡, 前部地形较缓, 自然坡度 $30^\circ \sim 35^\circ$, 滑坡全貌如图 2 所示。滑坡前缘高程约 100 m, 后缘高程约 319.5 m, 相对高差约 221.5 m, 平面纵向长度约 434 m, 横向宽 358 m, 面积约 $11.82 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体平均厚度约 34.5 m, 总体积约 $4.0779 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

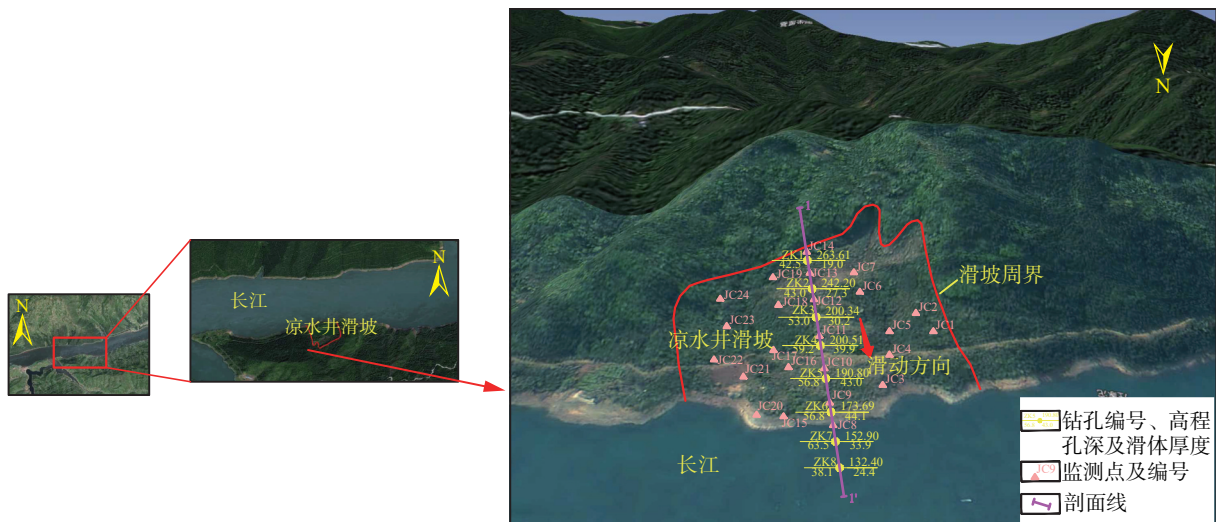


图 2 凉水井滑坡全貌

Fig. 2 The overall view of Liangshuijing landslide

凉水井滑坡滑体为滑坡堆积层, 主要由含角砾粉质黏土、人工填土、含碎石、块石黏土以及砂、泥岩块石组成; 滑床为中侏罗统沙溪庙组(J_2s)互层砂岩、泥岩;

滑动带为滑坡堆积与下伏基岩接触带, 滑动方向与现坡向基本一致。自三峡库区 175 m 试验性蓄水后, 受水位上升影响, 凉水井滑坡出现了不同程度的地表变形, 主

要表现为滑坡后缘地表拉张裂缝全部贯通, 滑坡中部横向地表出现拉裂缝、中前部出现剪切裂缝以及两侧出

现斜裂缝, 典型剖面如图 3 所示。

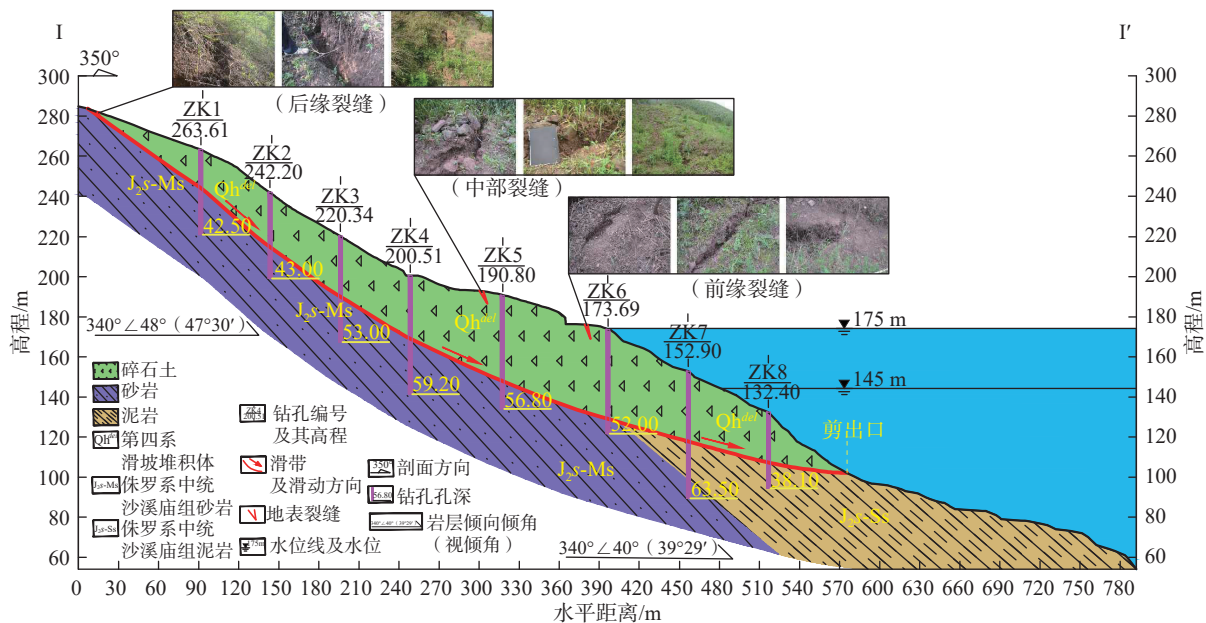


图 3 凉水井滑坡典型地质剖面图

Fig. 3 Typical geological cross-section of the Liangshuijing landslide

2.2 变形特征分析

图 4 为凉水井滑坡滑面形态特征, 滑带土厚度为 3~5 cm, 可见明显的擦痕, 呈镜面, 有光泽, 局部有揉搓现象, 混杂的少量泥岩碎石有挤压、角砾磨光现象, 且后壁光滑, 此为滑坡移动的特点。

根据凉水井滑坡监测结果^[17], 由图 5 知, 地表累积位移随时间推移逐渐增加, 累计水平位移变形量平均为 52.92 mm, 最大已达 93.88 mm。该滑坡变形从后部到前部、右侧到左侧、高处到低处存在轮流交接变形的特征。滑坡地表裂缝宽度累积与时间的变化关系如图 6 所示, 图中所示裂缝宽度最大达到了 28.35 mm, 裂缝宽度累计变化量较大的监测点均分布在滑坡的右侧和后缘, 说明滑坡主要变形部位位于滑坡的右侧和后缘, 而位于滑坡左侧的监测点变化量较小, 表明滑坡的整体变形方向是从滑坡的后缘右侧向滑坡前缘左侧推移挤压。随着库水位的波动, 坡体地表累积位移量逐渐增加, 滑移变形较明显。

2.3 滑带弱化分析

按照《三峡库区三期地质灾害防治工程地质勘察技术要求》, 滑坡稳定性分级情况如下: 当稳定性系数 $F_s < 1$ 时, 为不稳定状态; $1.00 < F_s \leq 1.05$ 时, 为欠稳定状态; $1.05 < F_s \leq F_{st}$ 时, 为基本稳定状态; $F_s > F_{st}$ 时, 为稳

定状态。根据前述稳定性计算方法可得出图 3 所示剖面的稳定系数 F_s 随库水位的变化, 如图 7(a) 所示, 可见坡体稳定性随库水位的下降由基本稳定状态过渡为欠稳定状态。根据勘查所取滑带土进行的室内抗剪试验结果分析, 得出滑带抗剪强度与库水位变化关系, 如图 7(b) 所示, 凉水井滑坡随库水位周期波动, 滑带抗剪强度逐渐弱化, 库水位从 175 m 降到 145 m, 抗剪强度降低了 19%, 滑坡在渗流驱动下启动变形, 总体呈现蠕滑变形特征。以上分析印证了在库水位升降作用下滑带土体抗剪强度的弱化效应。

图 8 为滑带土抗剪参数反演关系, 其根据滑坡体的特征及现状, 由已知的稳定状态 (取 $F_s = 1.02$), 反算出滑坡的综合抗剪强度参数取值。在 c 值不变时按线性差值法确定剖面稳定系数对应的 φ 值。根据反演计算结果, 当黏聚力 $c > 11$ kPa、内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 时, 滑坡处于基本稳定状态; 当 $11 \text{ kPa} < c < 20 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 24^\circ$ 时, 滑坡处于欠稳定状态; 当 $11 \text{ kPa} < c < 19 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 23^\circ$ 时, 滑坡处于不稳定状态。根据前述渗流驱动力计算方法可得渗流驱动力与库水位降落速度关系如图 9 所示, 可知渗流驱动力随库水位降落速度增大而增大, 水流在滑坡土体中形成的流动管道被扩宽, 孔隙与孔隙间逐渐被连通, 土颗粒随水流流失, 孔隙率逐渐增加, 呈现渗流驱动



图 4 凉水井滑坡滑面形态特征

Fig. 4 Morphological characteristics of the sliding surface of the Liangshuijing landslide

力不断增大的现象。而库水位降落速度较小时, 由于土体本身存在的滞后效应, 导致渗流驱动力较小。

2.4 滑移机制验证

根据现场调查, 结合该滑坡地形地貌、滑面形态、物质组成等特征分析, 综合确定其形成原因为原岩质顺层老滑坡前缘在江水侵蚀、剥蚀以及河床切割作用下, 前缘临空, 产生滑移, 并堆积于原地面上而形成该新滑坡。由于滑坡中前部及前部滑体主要为砂岩块石, 其强度、刚度均较大, 在滑动过程中, 将原地面以下松散土层及强风化泥岩推移至新滑坡前缘, 并在江水长期作用下产生库岸再造, 最终形成现状地形地貌。且调查区可见基岩陡崖产生的崩坡积层以及陡崖上方的残坡积层在水、自身重力作用下堆积于新近形成的滑坡表层, 最终形成现状滑坡滑体中前部较厚, 后部逐渐变薄的趋势。而基于前文分析, 滑坡体的变形和滑动取决于坡体

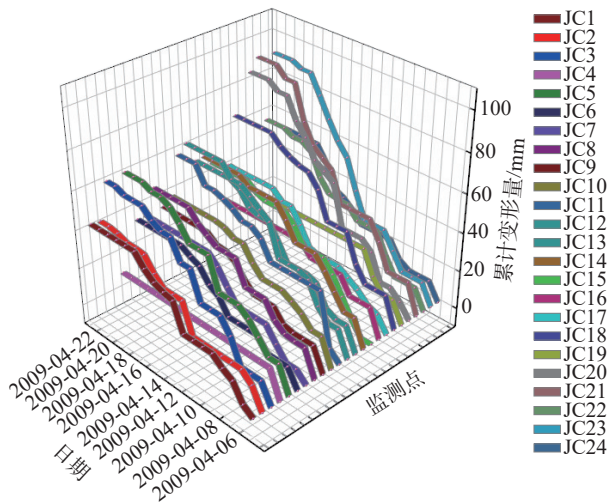


图 5 地表累积位移与时间的关系

Fig. 5 The relationship between cumulative surface displacement and time

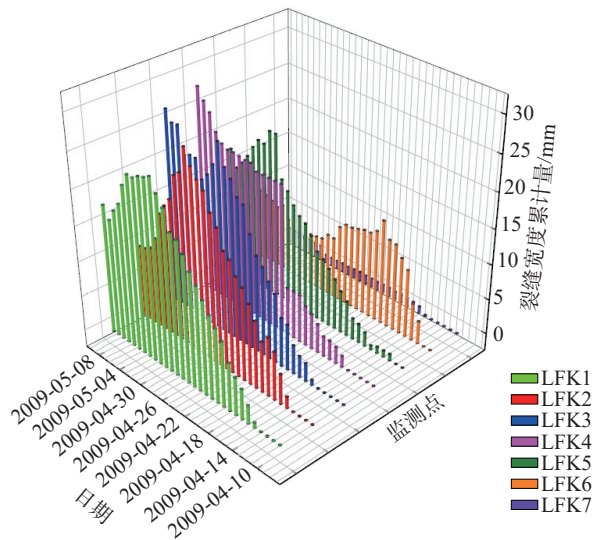


图 6 地表裂缝宽度累积与时间的关系

Fig. 6 The relationship between cumulative surface crack width and time

的应力分布和强度特性, 滑坡在库水位升降作用下, 滑带土体抗剪强度及其它力学性质会有不同程度的弱化效应, 使得滑坡前缘阻滑段有效抗滑力减小, 而库水的长期侵蚀作用又使前缘滑体被剥蚀, 最终导致滑坡稳定性降低, 当下滑力超过抗滑力时, 坡体将产生滑移破坏。

综上, 将其灾变滑移演化机制分为以下四个阶段:

阶段一: 岸坡长期受到长江水的冲刷和侵蚀, 滑带抗剪强度逐渐弱化, 前缘涉水区域逐渐被掏空而产生临空面, 前缘发生了局部滑移, 造成原始岸坡抗滑力减小。

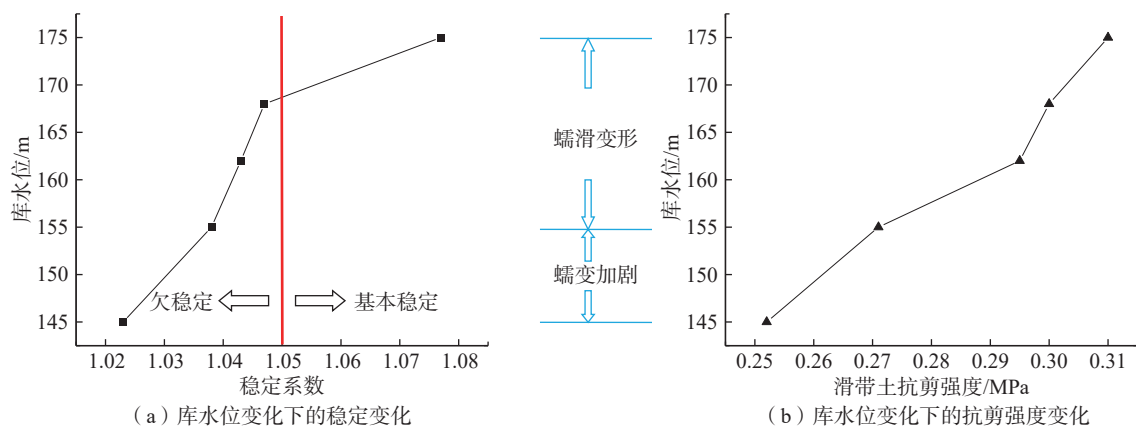


图 7 凉水井滑坡稳定系数 F_s -库水位(左)变化与滑带抗剪强度-库水位(右)变化

Fig. 7 Stability coefficient F_s - change of reservoir water level (left) and shear strength of sliding zone - change of reservoir water level (right) of Liangshuijing landslide

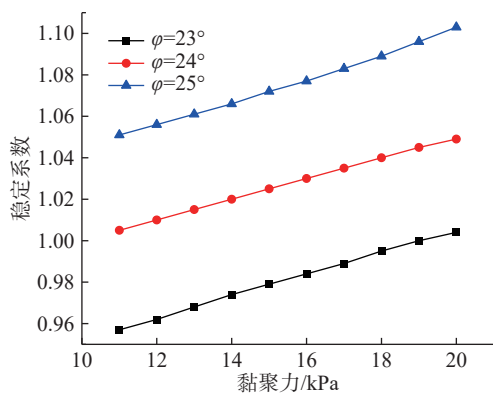


图 8 滑带土抗剪参数反演

Fig. 8 Inversion of shear resistance parameters for the sliding zone soil

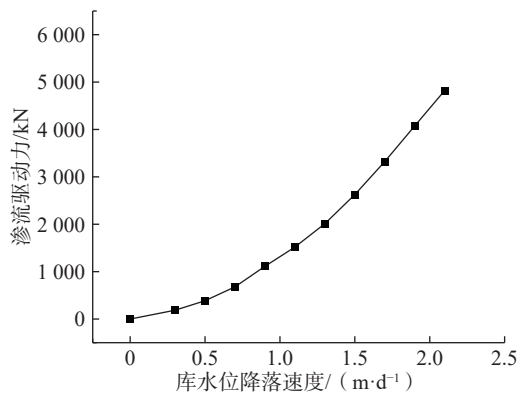


图 9 渗流驱动力与库水位降落速度变化关系

Fig. 9 The relationship between seepage driving force and falling rate of reservoir water level

阶段二: 原始岸坡前缘发生局部变形后, 中后缘坡体失去前部支撑作用, 当滑带抗剪强度弱化至临界强度时, 原始岸坡整体启滑, 形成老滑坡。

阶段三: 在原始岸坡发育为老滑坡后, 由于库水位的波动及降雨影响, 滑带抗剪强度损伤弱化进一步加强, 老滑坡发生多次多级滑移, 坡体后缘物质逐渐向中前部迁移堆积, 形成了新滑坡的滑体堆积体。

阶段四: 滑坡堆积体形成后, 库水位的继续波动与降雨影响, 新滑坡滑带抗剪强度等力学参数再一次被弱化损伤, 滑坡变形加剧, 滑坡后缘地表出现拉张裂缝, 中前部出现剪切裂缝等, 且全部贯通, 形成了最终的凉水井滑坡。

凉水井滑坡形成机制及启滑过程如图 10 所示。

3 数值分析

3.1 渗流稳定性计算模型

选取如图 3 所示的滑坡典型剖面作为计算分析剖

面, 采用 Geo-studio 有限元软件中 SEEP/W 模块计算滑坡渗流场, 采用 SLOPE/W 模块计算渗流驱动下的滑坡稳定性。根据凉水井滑坡地质模型, 对于饱和与非饱和的渗流问题建立如图 11 所示的数值计算模型, 模型节点数为 2061, 单元数为 1955。将滑面设置为隔水边界, 库水位 175 m 以上地表为定流量边界, 以下为变水头边界。模拟库水位下降条件的渗流演变规律时, 以 175 m 水位的稳态渗流作为初始渗流场, 模拟库水位上升条件的渗流演变规律则以 145 m 水位的稳态渗流作为初始渗流场。

3.2 计算参数及工况

凉水井滑坡地勘报告及室内试验获取的滑坡物理力学参数如表 1 所示, 三峡库区每年汛期为降雨量较大的 5—9 月, 库水位波动特征总体是每年 1—9 月^[18-22], 为探究库水升降作用下滑坡渗流场演变规律, 设置两种模拟工况, 库水位从 175 m 以 0.5 m/d、0.7 m/d、0.9 m/d、

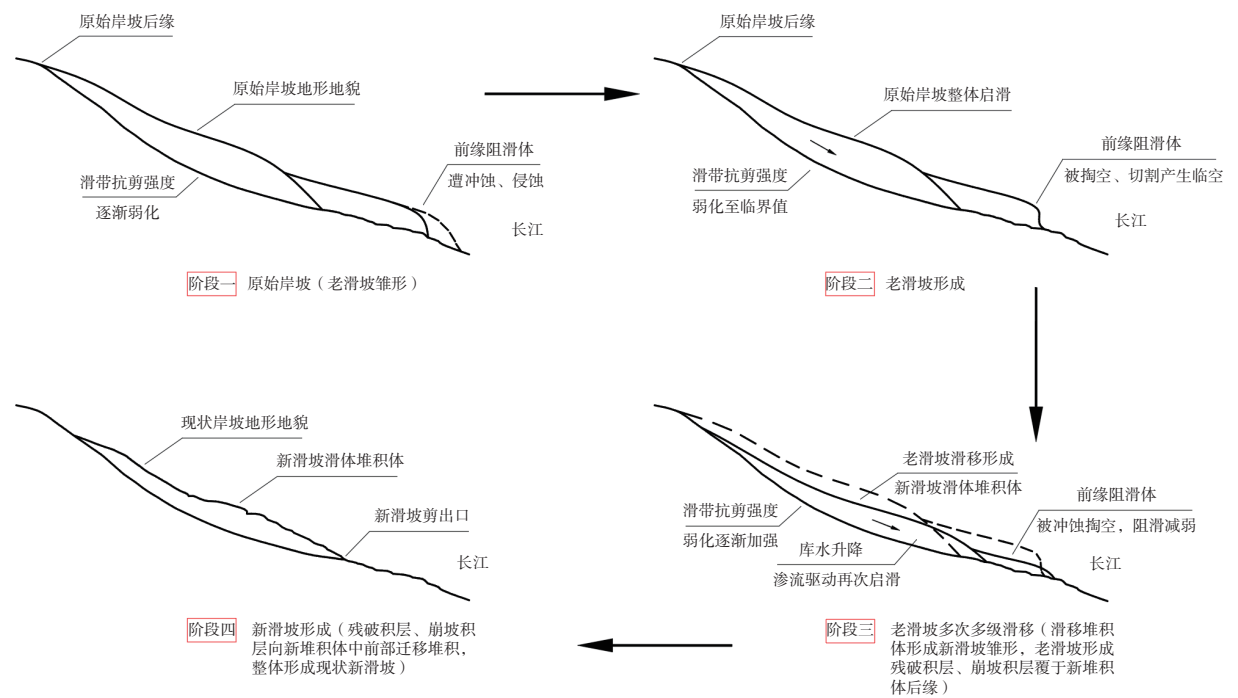


图 10 凉水井滑坡启动及演化机制

Fig. 10 Initiation and evolution mechanism of Liangshuijing landslide

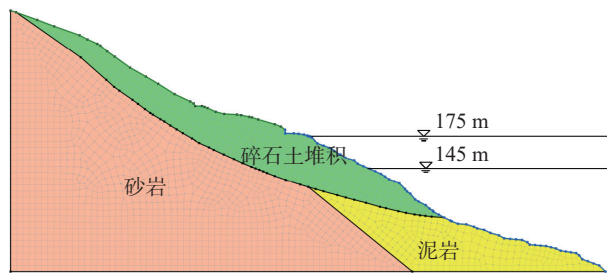


图 11 凉水井滑坡渗流分析有限元模型

Fig. 11 Finite element model for seepage analysis of Liangshuijing landslide

1.1 m/d 的速率下降到 145 m 为工况一, 汛期过后从 145 m 又以 0.5 m/d、0.7 m/d、0.9 m/d、1.1 m/d 的速率上升到 175 m 水位为工况二, 将 30 m 的水位差作为库水位涨落值。

3.3 计算结果分析

图 12 为库水升降作用下凉水井滑坡地下水渗流场演变规律, 库水位上升到 175 m 后, 坡体中前缘部位的

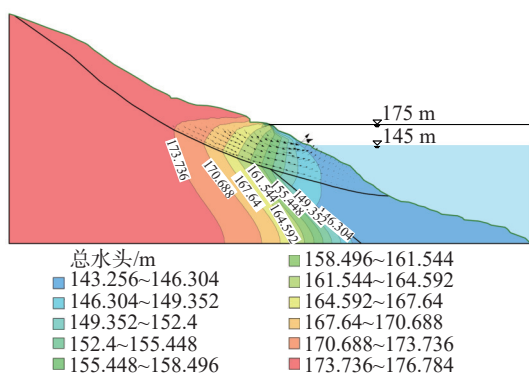
总水头均进一步的升高, 见图 12(A2), 在水位降落过程中, 后缘有足够的水量补充, 由后缘流向前缘, 在与库水接触溢流区流速最大, 见图 12(A1)。由图 12(B1)、(B2)知, 库水位升降条件下, 滑坡体前缘孔隙水压为正值, 中后缘为负值, 最大值为 1 675.8 kPa。由图 12(C1)、(C2)所示的体积含水率变化知, 库水位涨落过程中由于滞后效应, 体积含水率较大区域均集中在滑坡体前缘部位。而土体饱和度变化趋势, 上升过程呈上凹状, 下降过程呈下凹状, 饱和到非饱和的过渡区域较小, 见图 12(D1)、图 12(D2)。无论库水位上升还是下降, 坡体内的浸润面中部都呈现缓慢上升或下降, 越远离库水面, 水位影响越小, 见图 12(E1)、图 12(E2)。

图 13 表示库水位升降速率分别为 0.5 m/d、0.7 m/d、0.9 m/d、1.1 m/d 的滑坡稳定性, 可见稳定系数 F_s 的变化随升降速率的增大而增大, 库水上升过程中, 滑坡内部地下水位的爬升滞后于库水位, 形成内低外高的压力差, 稳定性增加。而在库水位下降过程中, 形成内高外

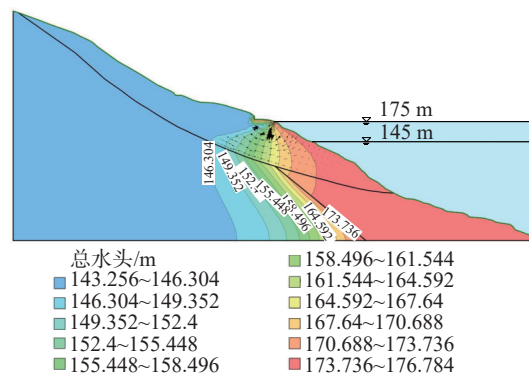
表 1 滑坡计算参数一览表

Table 1 List of calculation parameters for Liangshuijing landslide

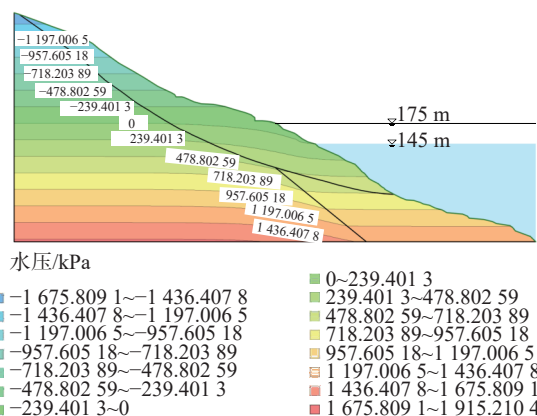
岩土体	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
			天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
滑床	24	0.2	25.1	25.3	5 650	5 420	47.04	43.80
滑带	3	0.4	23.0	23.8	19.17	14.41	25.03	24.29
滑体	3	0.4	23.0	23.8	21.48	19.29	34.83	27.68



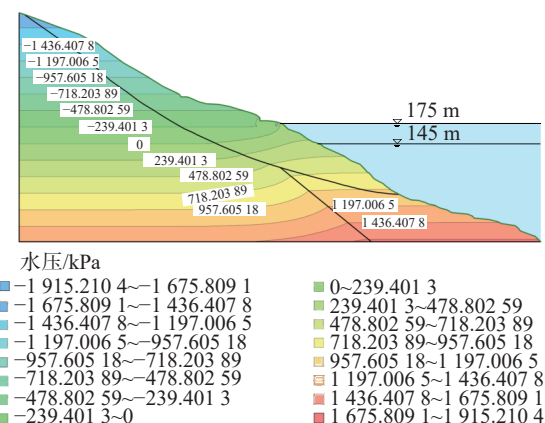
(A1) 175~145 m总水头等值线变化与流线特征



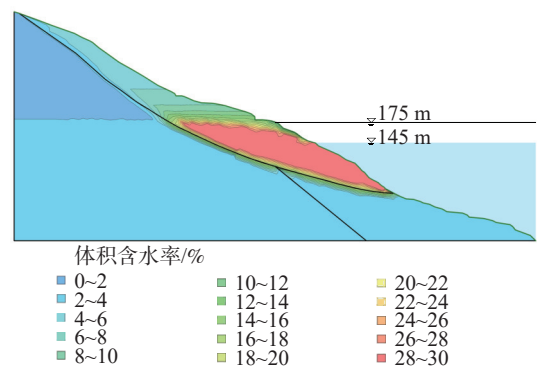
(A2) 145~175 m总水头等值线变化与流线特征



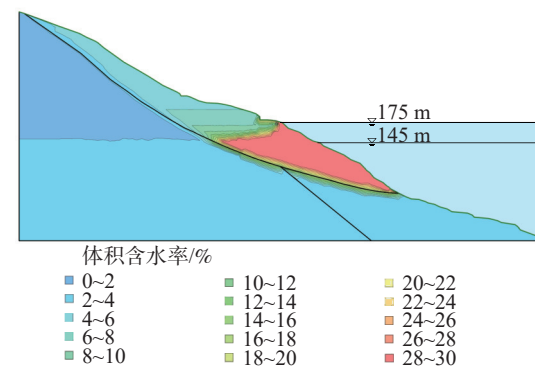
(B1) 175~145 m孔隙水压变化



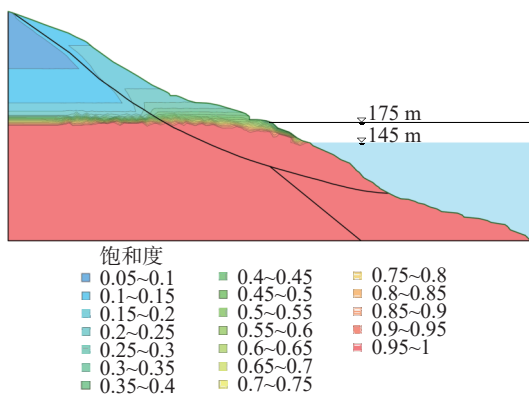
(B2) 145~175 m孔隙水压变化



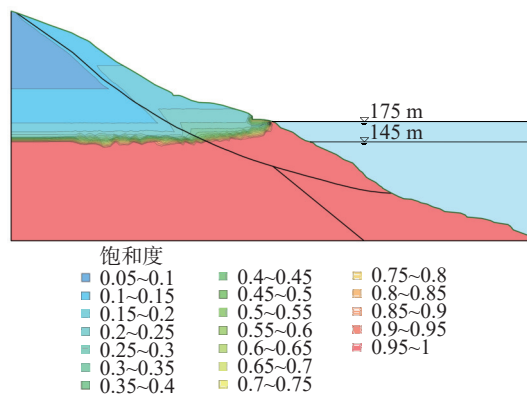
(C1) 175~145 m体积含水量变化



(C2) 145~175 m体积含水量变化



(D1) 175~145 m土体饱和度变化



(D2) 145~175 m土体饱和度变化

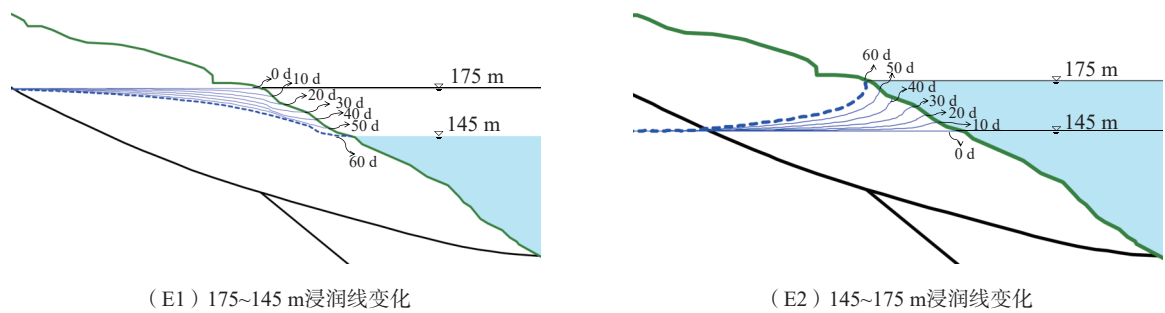


图 12 库水升降作用下凉水井滑坡地下水渗流场演变

Fig. 12 Evolution of groundwater seepage field of Liangshuijing landslide under the action of reservoir water level rise and fall

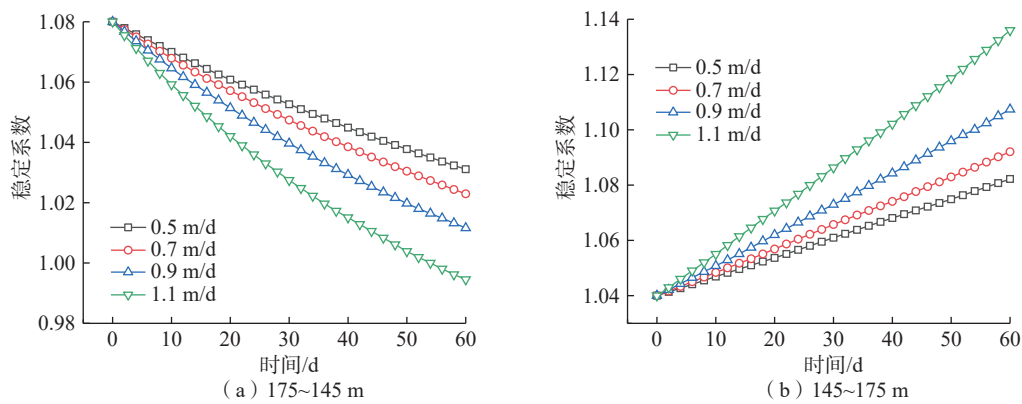


图 13 库水升降作用下凉水井滑坡稳定性变化

Fig. 13 Stability change of Liangshuijing landslide under the action of reservoir water level rise and fall

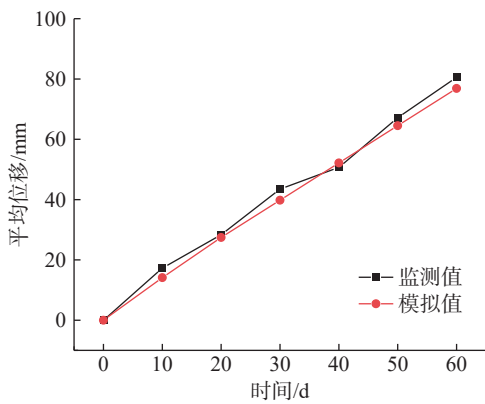


图 14 凉水井滑坡平均位移随降水时间变化

Fig. 14 Variation of average displacement of Liangshuijing landslide with precipitation over time

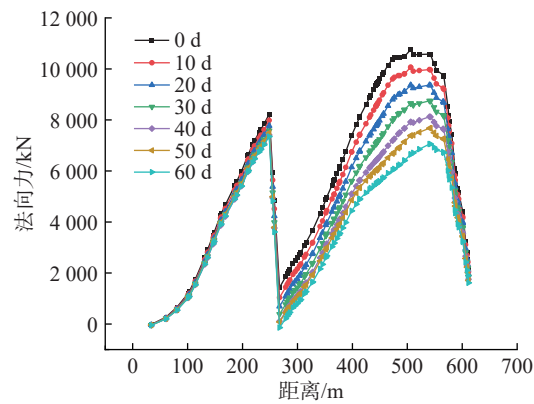


图 15 降水条件下滑面法向力变化

Fig. 15 Variation of normal force on sliding surface under precipitation conditions

低的压力差, 渗流力成为向外推动坡体的驱动力, 滑坡稳定性降低。图 14 为凉水井滑坡平均位移随降水时间变化曲线, 可知随着库水位的下降, 坡体地表累积平均位移量逐渐增加, 滑移变形越明显。

图 15 所示为降水条件下滑面法向力变化, 可知法向力峰值随降落时间的推移逐渐减小, 滑面从非饱和向饱和过渡过程中, 法向力弱化度逐渐增加, 从 175 m 水

位降到 145 m, 法向力最大降低了 38.19%。图 16 为降水条件下滑面剪力变化, 其变化规律与法向力变化基本一致, 且剪力最大降低了 22.20%。

图 17 为库水升降条件下滑坡孔隙水压变化, 从非饱和向饱和过渡过程中, 降水条件下土体孔隙水压增长幅度随降落时间的推移逐渐减小, 根据有效应力原理, 该区段有效法向力衰减将随降落时间的推移而逐渐增

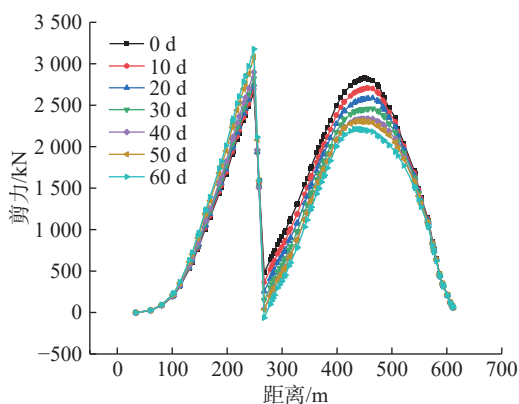


图 16 降水条件下滑面剪力变化

Fig. 16 Variation of shear force on sliding surface under precipitation conditions

大, 抗剪强度衰减规律亦如此, 其变化曲线如图 18 所示。图中有效法向应力最大落差为 168.64 kPa, 抗剪强度最大落差为 63.45 kPa。

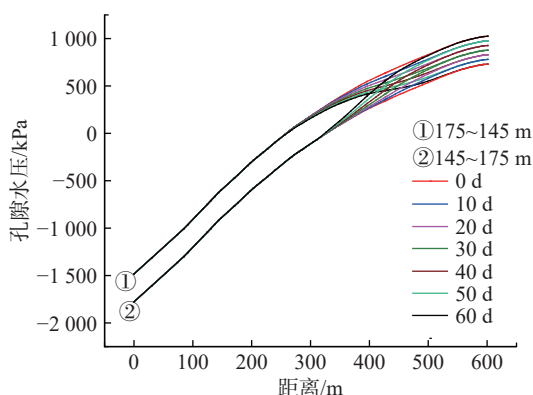


图 17 库水升降条件下滑坡孔隙水压变化

Fig. 17 Changes in pore water pressure of the landslide under reservoir water level rise and fall conditions

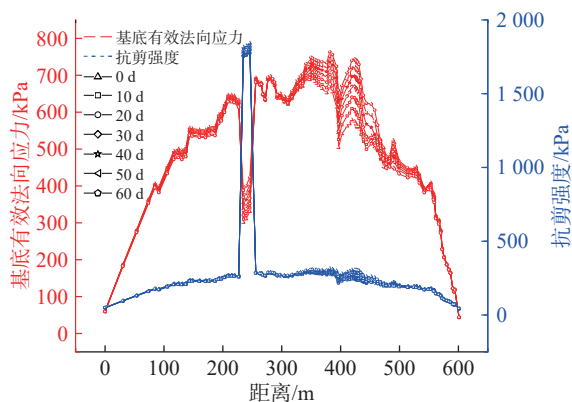


图 18 降水条件下滑面有效法应力与抗剪强度变化

Fig. 18 Variation of effective normal stress and shear strength on sliding surface under precipitation conditions

4 结论

(1) 库水升降作用对滑带强度会产生弱化效应, 且渗透压力与渗透时间的变化是滑带土强度弱化的关键因素, 弱化到临界强度时, 在渗流驱动作用下滑带土体会发生压剪破坏而启滑。

(2) 库水升降过程中, 坡体内孔隙水压力滞后性较明显, 水位升降速率会影响坡体地下水响应时程, 升降速率越大, 渗流驱动力越大, 滑坡稳定性变化越快, 越趋近于渐进破坏。且库水位不论以多大的速率升降, 坡体内浸润面中部都呈现缓慢上升或下降趋势变化。

(3) 库水从 175 m 水位以 0.5 m/d 的速率降到 145 m, 凉水井滑坡滑面法向应力最大降低了 38.19%, 剪应力最大降低了 22.20%, 有效法向应力最大落差为 168.64 kPa, 抗剪强度最大落差为 63.45 kPa。

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] 肖捷夫, 李云安, 胡勇, 等. 库水涨落和降雨条件下古滑坡变形特征模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 471-480. [XIAO Jiefu, LI Yunan, HU Yong, et al. Model tests on deformation characteristics of ancient bank landslide under water level fluctuation and rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 471-480. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李跃, 徐卫亚, 易魁, 等. 堆积体滑带土非饱和-饱和渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1355-1362. [LI Yue, XU Weiya, YI Kui, et al. Experimental study of unsaturated-saturated permeability characteristics of slip soil in landslide deposits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1355-1362. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HE Chuncan, HU Xinli, XU Chu, et al. Model test of the influence of cyclic water level fluctuations on a landslide [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(1): 191-202.
- [5] TU Guoxiang, DA Huang, DENG Hui. Reactivation of a huge ancient landslide by surface water infiltration [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(4): 806-820.
- [6] CAO Chunhui, FENG Jili, TAO Zhigang. Start-up mechanism and dynamic process of landslides in the full high waste dump [J]. Water, 2020, 12(9): 2543.

- [7] 陈小平, 黄勋. 强度折减中滑坡启动阶段的动力分配原理 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018(4): 809–819. [CHEN Xiaoping, HUANG Xun. Mechanism of dynamic distribution in the stage of landslide initiation with shear strength reduction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018(4): 809–819. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘梦琴, 陈勇. 基于直剪试验的滑带土强度再生特征研究 [J]. 人民长江, 2018, 49(18): 92–96. [LIU Mengqin, CHEN Yong. Strength regeneration characteristics of sliding zone soil based on direct shear test [J]. Yangtze River, 2018, 49(18): 92–96. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 高玮, 冯威, 王家超, 等. 一种基于滑动带的土坡稳定分析方法研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 1–6. [GAO Wei, FENG Wei, WANG Jiachao, et al. Stability analysis method of soil slope based on sliding zone [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 1–6. (in Chinese with English abstract)]
- [10] ZHU Feng, DUAN Zhongyuan, WU Zhenyu, et al. Experimental study on direct shear creep characteristics and long-term strength of red layer sliding zone soil in southern Hunan [J]. Advanced Materials Research, 2013, 842: 782–787.
- [11] LIU Q B, WANG S, XIA D S, et al. Experimental study of residual-state creep behavior of intact sliding-zone soil [J]. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1305–1313.
- [12] LIAO Kang, WU Yiping, MIAO Fasheng, et al. Effect of weakening of sliding zone soils in hydro-fluctuation belt on long-term reliability of reservoir landslides [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5): 3801–3815.
- [13] ZHAO Yong, ZHU Liubing, HU Wenyi, et al. Analysis of stability factors and interaction rules of soil slope under heavy rainfall [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(3): 032037.
- [14] 鲁文博, 吴益平, 廖建民, 等. 渗透作用下滑带土强度弱化规律研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(2): 345–350. [LU Wenbo, WU Yiping, LIAO Jianmin, et al. The law of residual strength weakening of slip soil under the action of seepage [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2016, 40(2): 345–350. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 仵彦卿. 岩土水力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [WU Yan qing. Rock and Soil hydraulics [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [16] 周云涛, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡水库泄水期间类土质岸坡渗流驱动压剪破坏机制研究 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(6): 37–44. [ZHOU Yuntao, TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Study on compression-shear failure mechanism by seepage-driving for the quasi earthy bank slope during the drawdown in Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(6): 37–44. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 重庆市高新岩土工程勘察设计院. 重庆市云阳县故陵镇凉水井滑坡应急勘查报告 [R]. 重庆: 重庆市高新岩土工程勘察设计院, 2009. [Chongqing Gaoxin geotechnical engineering survey and Design Institute Emergency investigation report on Liangshuijing landslide in Guling Town, Yunyang County, Chongqing [R]. Chongqing: Chongqing Gaoxin geotechnical engineering survey and Design Institute, 2009. (in Chinese)]
- [18] 夏敏, 任光明, 马鑫磊, 等. 库水位涨落条件下滑坡地下水渗流场动态特征 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 399–405. [XIA Min, REN Guangming, MA Xinlei, et al. Dynamic responses of groundwater seepage of landslide influenced by fluctuation of reservoir water level [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 399–405. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 汤明高, 吴川, 吴辉隆, 等. 水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 115–125. [TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, et al. Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 115–125.]
- [20] 王孔伟, 路永强, 聂进, 等. 三峡库区仙女山和九畹溪断裂带水库地震变化规律 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 624–637. [WANG Kongwei, LU Yongqiang, NIE Jin, et al. Earthquake variation law of Xiannüshan and Jiawanxi fault zones in Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 624–637.]
- [21] 王玉川, 郭其峰, 周延国. 中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析——以拖担水库左岸坝肩滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(4): 17–23. [WANG Yuchuan, GUO Qifeng, ZHOU Yanguo. Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan Reservoir dam [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 17–23.]
- [22] 郭延辉, 杨溢, 杨志全, 等. 国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 66–72. [GUO Yanhui, YANG Yi, YANG Zhiquan, et al. Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 66–72.]