

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.05.024

澜沧江某巨型堆积体蓄水失稳模式预测研究

胡大儒,肖万春,王晓朋,吴述或

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 在大量的勘察及试验基础上,将澜沧江某巨型堆积体的形成机制划分为崩塌堵江、冲堆平衡、间歇堆积、河谷再下切四个阶段。运用刚体极限平衡法、有限元强度折减法、基于饱和非饱和理论的有限元法进行堆积体稳定性及地下水渗流分析。结果表明:当蓄水位上升时,堆积体前缘首先发生局部圆弧型滑塌,随后堆积体中部将沿碎石层内部发生折线型深层滑移,最终堆积体将沿基覆界面发生推移型整体失稳破坏;当蓄水位下降时,坡体中部砾石层及前缘局部区域构成主要渗流通道,堆积体稳定系数先降后升,但水位总降幅及总历时一定时,堆积体稳定系数总减小量基本相当。回归分析显示,水位骤降速率与堆积体稳定系数日增量成负相关,其相关函数类型为二次抛物线。

关键词: 澜沧江;堆积体;成因机理;失稳模式;渗流;数值模拟

中图分类号: TV443

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)05—0137—06

Prediction of Instability Model During Impoundment Period of a Giant Deposit in Lantsang River

HU Daru, XIAO Wanchun, WANG Xiaopeng, WU Shuyun

(Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Based on a large number of investigations and experiments, this paper divides the formation mechanism of a giant deposit of Lantsang into four stages: slope collapsing and river blocking, scouring and accumulating balance, intermittent accumulation and river valley cutting. According to the analysis of the stability of the deposit and the seepage of groundwater by using the rigid limit equilibrium method, the finite element strength reduction method and the FEM based on the saturated-unsaturated theory, when the water level of the reservoir rises, the front edge of the deposit will firstly collapse in the form of local circular arc, then the middle part of the deposit will slide along the gravel layer, and finally the deposit will push along the base interface. When the water level of the reservoir drops, the gravel layer in the middle of the slope and the local area of the front edge form the main seepage channel, and the stability factor of the deposit first drops and then rises, but when the total drop of the water level and the total duration are fixed, the total decrease of the stability factor of the deposit is basically the same. Regression analysis shows that the rate of sudden drop of water level is negatively related to the daily increment of the stability factor of the deposit, and the correlation function type is quadratic parabola.

Keywords: Lantsang; deposit; formation mechanism; instability mode; seepage; numerical simulation

自然界大量边坡失稳破坏均与水的活动有关,对于水库型滑坡,其稳定性直接受库水位升降的影响。水库蓄水边坡失稳模式的精准预测及评价对于优化设计、降低成本、防灾减灾等均具有重要意义,也是长期困扰业界的技术难题。国内外学者在大量

工程实践及理论研究的基础上,取得了丰富的研究成果:黄润秋等^[1]经统计分析得出国内大型滑坡发育最根本的原因是具有有利的滑坡地形地貌条件,约80%的大型滑坡发生在环青藏高原东侧的大陆地形第一个坡降带范围内。张倬元等^[2-3]提出水库

滑坡常见的 5 种变形失稳模式:蠕滑-拉裂、滑移-压致拉裂、弯曲拉裂、塑流-拉裂和滑移弯曲。刘才华等^[4]通过对库水位上升诱发边坡失稳机理的研究,得出库水位上升对边坡稳定性的影响主要表现在孔隙水压力作用和浸水滑动面强度参数的弱化两方面。罗红明等^[5]和刘新喜等^[6]运用不平衡推力法进行水位骤降时滑坡稳定性分析,得出库水位升降对滑坡稳定性的影响差异性明显,地下水作用的力学模式、库水位下降速度和滑坡渗透系数大小是影响滑坡暂态渗流场变化的主要因素。唐晓松等^[7]提出了水位下降过程中滑坡体的变形特征和稳定性动态变化规律的数值极限分析方法。其他学者^[8-21]则采用物理模型试验、数值模拟等方法,深入研究了在蓄水位升降时,涉水型堆积层滑坡、水动力型滑坡等稳定性的变化规律,为滑坡的早期识别、稳定性预判、预警措施、治理方案等提供可靠依据。澜沧江峡谷区具有海拔高、昼夜温差大、干旱少雨、循环冻融等极端气象条件,和地形地貌陡峻、风化卸荷强烈、地质构造发育等复杂地质条件。因其独特的环境地质条件,澜沧江河谷两岸堆积体广泛分布,且规模巨大。随着水库蓄水位的变化,堆积体是否会发生变形失稳并演化为滑坡灾害,是工程关注的重点。本文在地质成因分析及数值模拟的基础上,对澜沧江某巨型堆积体在不同蓄水工况下可能的失稳模式进行预测研究,为工程设计拓展思路,为同类研究提供参考。

1 堆积体基本地质条件

拟建工程为砾石土心墙堆石坝,最大坝高 315 m,正常蓄水位 2 895 m 高程,对应水库回水长约 98 km。该巨型堆积体发育于澜沧江左岸坝前 5.4 km 处,前缘临江,高程 2 655 m,后缘高程 3 300 m。堆积体顺河向长约 1.4 km,垂直河向宽约 700 m,自然坡度 $32^\circ \sim 37^\circ$,堆积体厚 10 m ~ 100 m,约 4 700 万 m^3 ,堆积体范围内发育多条浅切小冲沟,地表及平洞内现状均未见变形迹象。堆积体地形地貌航拍图见图 1。

经勘探及试验揭示,堆积体下伏基岩为三叠系竹卡组(T_2z)英安岩,堆积体由 3 类土层构成:

第①类为有一定胶结的含细粒土砾($Q^{\text{col}+dl-1}$),位于堆积体中上部,砾石粒径 3 cm ~ 6 cm,含量约 55%,其间为砂质土充填,较为密实,平洞开挖时可临时自稳。第②类为较松散的碎砾石层($Q^{\text{col}+dl-2}$),位于堆积体中上部,碎石粒径 5 cm ~ 20cm,含量约

45%,砾石粒径 3 cm ~ 5 cm,含量约 40%,局部有少量块石,粒径 20 cm ~ 50 cm,结构松散,平洞开挖到该层时多塌方。第③类为碎块石土,夹有少量砂卵石砾石($Q^{\text{col}+dl+al}$),主要位于堆积体中下部,碎石含量约 40%,粒径 6 cm ~ 20 cm,块石含量约 20%,粒径 20 cm ~ 40 cm,卵石含量 10% 左右,粒径 6 cm ~ 10 cm。堆积体工程地质平面图见图 2,剖面图见图 3。

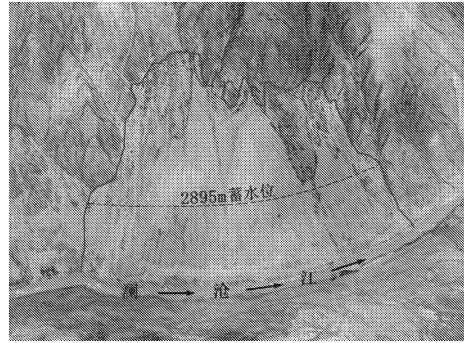


图 1 堆积体地形地貌航拍图

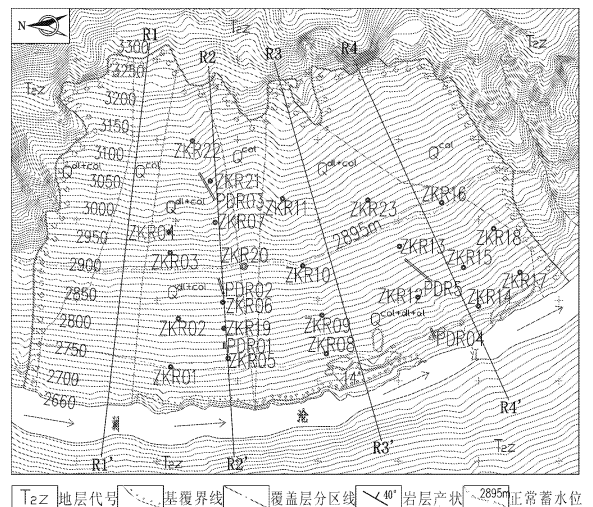


图 2 堆积体工程地质平面图

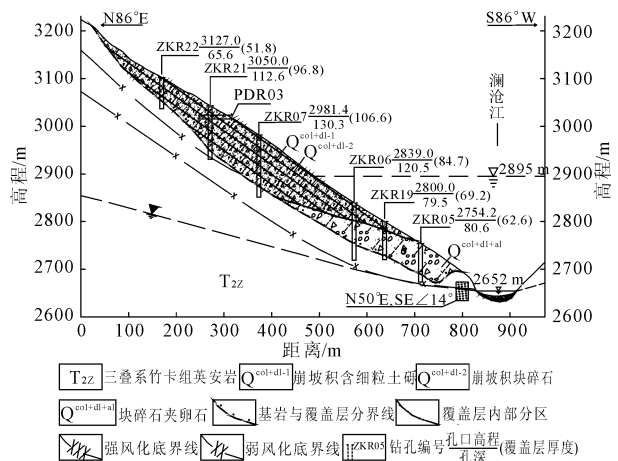


图 3 堆积体工程地质剖面图

2 堆积体成因机制分析

堆积体中上部物质组成主要为崩坡积成因的碎块石和碎石土相间分布,下部受河流改造混杂有少量的冲积砂卵石。其形成过程可分4阶段:

(1) 崩塌堵江阶段。ZKR08、ZKR14等钻孔揭示的基岩深槽表明,二级阶地以上澜沧江早期河道应偏向左岸,当河谷下切至2 670 m高程时,在地震等因素影响下,左岸高高程风化卸荷岩体发生大规模崩塌,堆积于岸坡及河床并堵塞河道抬高河床。

(2) 冲堆平衡阶段。PDR05平洞揭示的卵石及上游河道局部粉土沉积表明,本段河床因崩塌堵江而快速抬升,至2 780 m高程时,冲、堆趋于平衡,并沉积了较为集中的河流冲积物(③类土)。

(3) 间歇堆积阶段。PDR02、PDR03平洞揭示倾斜坡外的沉积韵律表明,堆积体中上部至少经历

了15次以上的间歇性崩塌堆积,单次堆积厚度3 m~15 m,以结构松散的块碎石为主(②类土)。在间隔时间较长的两次堆积之间,受降雨、冰雪融水等坡表径流影响,较多的细粒土下渗,形成较为密实并有泥质胶结的含细粒土(①类土)。

(4) 河谷再下切阶段。堆积体前缘受河流冲刷继续下切,直至现代河床2 640 m高程,受堆积物挤占,新河道向右岸偏移。随后堆积体上部继续接收新近崩坡积物,直至顶部堆积到3 300 m高程。

3 堆积体物理力学参数分析

根据平洞揭露,堆积体底部基岩与覆盖层接触面无明显的软弱层面发育。结合堆积体地形坡度、碎砾石层天然休止角统计、现场原位剪切、室内直剪及颗分试验成果、现场试坑注水试验,堆积体物理力学参数建议值如表1所示。

表1 堆积体物理力学参数建议值表

成因分类	密度/(g·cm ⁻³)		φ /(°)		c/kPa		渗透系数/(cm·s ⁻¹)	变形模量/MPa	泊松比
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和			
第①类 Q ^{col+dl-1}	2.10	2.25	33.0	50	29.5	25	10 ⁻⁴	30	0.22
第②类 Q ^{col+dl-2}	2.20	2.30	34.5	10	30.5	5	10 ⁻¹	40	0.20
第③类 Q ^{col+dl+al}	2.15	2.25	35.5	20	31.5	10	10 ⁻³	35	0.21

4 堆积体蓄水失稳模式数值模拟分析

运用 Rocscience 软件基于莫尔-库仑准则的刚体极限平衡法、有限元强度折减法进行堆积体稳定性及破坏模式分析,运用基于饱和非饱和理论的有限元法进行堆积体地下水渗流分析。堆积体中上部物质组成为稍有胶结的含细粒土砾夹薄层松散碎砾石,该碎砾石层抗剪强度稍低,为相对弱面,层数15层以上,为潜在滑动面。本文仅选取其中浅层、中部、深层3层代表性弱面,对模型进行适当简化。基岩按无限强度考虑,各覆盖土层按均质各向同性材料考虑,模型两侧边界按水平约束,底部边界按固定约束考虑,采用平面应变条件的6节点三角形等参元进行网格划分。

4.1 水位上升工况模拟分析

分别取2 650 m(天然水位)、2 745 m(施工低水位)、2 815 m(死水位)、2 864 m(施工高水位)、2 895 m(正常蓄水位)等5个工况进行模拟分析,得到堆积体稳定系数与蓄水位关系见图4。不同蓄水位堆积体最大剪应变云图见图5—图7。

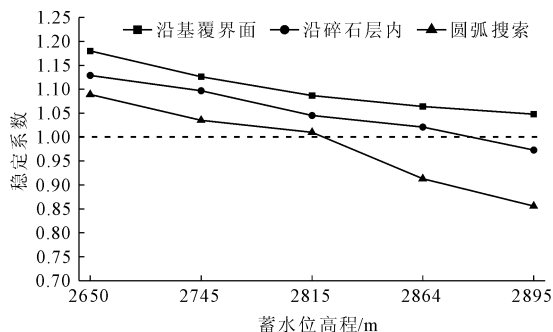


图4 蓄水位上升时堆积体稳定系数变化曲线

据图4—图7可知,随着蓄水位的抬升,堆积体水下区域受孔隙水压力作用,下滑力及抗滑力均有减小,且各土层遇水软化,其抗剪强度参数发生较大幅度的降低,不利于堆积体的稳定,总体上,堆积体稳定性呈逐渐降低趋势。当水位上升至2 815 m左右时,堆积体前缘局部开始发生圆弧型塌滑,随着水位继续上升,前缘塌滑范围逐渐扩大。当水位上升至2 880 m左右时,堆积体中后部将沿碎石层内部发生折线型深层滑移,当水位上升至2 895 m左右时,堆积体沿基覆界面整体处于欠稳定状态,此时堆积体主要变形模式为中后部推移型。

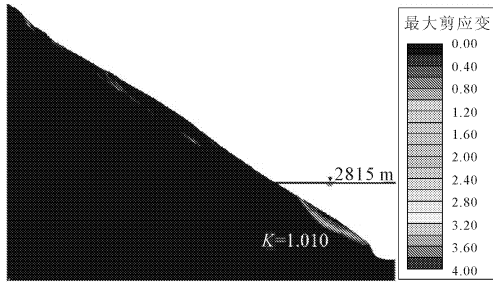


图 5 蓄水位 2 815 m 时堆积体最大剪应变云图

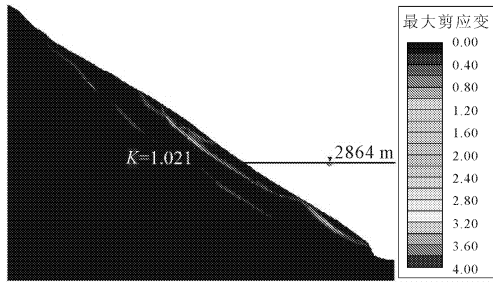


图 6 蓄水位 2 864 m 时堆积体最大剪应变云图

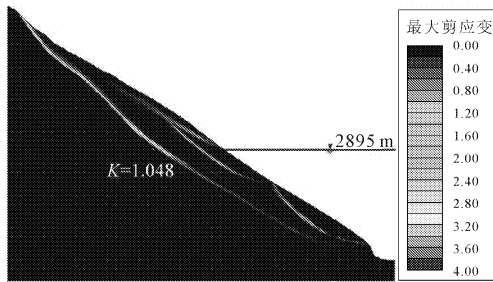


图 7 蓄水位 2 895 m 时堆积体最大剪应变云图

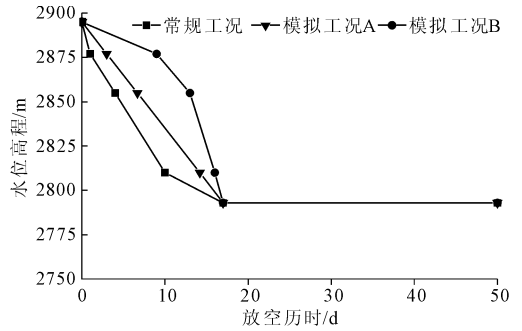


图 8 各工况水位与历时关系曲线图

(2) 堆积体渗流 - 稳定性耦合分析。堆积体沿基覆界面的整体稳定性受水位骤降影响较强,也是工程关注的重点,因此,本章只进行各水位骤降工况下,堆积体沿基覆界面的渗流 - 稳定性耦合分析。堆积体渗流 - 稳定性计算结果见表 3,堆积体沿基覆界面的整体稳定系数随水位骤降历时、水位降速关系曲线分别见图 9、图 10。

表 3 堆积体渗流 - 稳定性计算结果统计表

库水位 /m	历时/d			稳定系数		
	常规放空	模拟工况 A	模拟工况 B	常规放空	模拟工况 A	模拟工况 B
2895	0	0.0	0	0.995	0.995	0.995
2877	1	3.0	9	0.868	0.949	0.980
2855	4	6.7	13	0.811	0.830	0.937
2810	10	14.2	16	0.592	0.655	0.837
2793	17	17.0	17	0.579	0.577	0.577
2793	50	50.0	50	0.631	0.627	0.620

4.2 水位骤降工况模拟分析

(1) 水位骤降工况选择。本工程水库常规放空工况、本文模拟水位骤降工况见表 2、图 8。考虑到常规放空水位降速逐渐减小,故模拟工况 A 按水位恒定降速设计,模拟工况 B 按水位降速逐渐增大设计,各工况下,蓄水位总降幅均为 102 m,总历时均为 17 d。

表 2 水位骤降工况统计表

库水位 /m	历时/d			降速/(m · d ⁻¹)		
	常规放空	模拟工况 A	模拟工况 B	常规放空	模拟工况 A	模拟工况 B
2895	0	0.0	0			
2877	1	3.0	9	18.0	6.0	2.0
2855	4	6.7	13	7.3	6.0	5.5
2810	10	14.2	16	7.5	6.0	13.5
2793	17	17.0	17	1.0	6.0	17.0
2793	50	50.0	50	0.0	0.0	0.0

据图 9 可知,各水位骤降工况下,堆积体沿基覆界面的整体稳定系数均小于 1.0,均将整体失稳。随着水位的下降,堆积体稳定系数逐渐降低,但水位总降幅(102 m)及总历时(17 d)一定时,堆积体稳定系数总降幅基本相当。水位下降速率越快,土体内地下水来不及排出坡外,出渗点高程越高,渗流力越大,堆积体稳定性越差;水位下降速率越慢,土体内地下水有足够时间排出坡外,趋于与坡外水位平齐,出渗点高程越低,渗流力越小,对堆积体稳定性的影响越小。水位骤降完成后,以 2 793 m 稳定水位保持至第 50 d,渗流逐渐微弱,渗透力接近消失,堆积体整体稳定系数将有一定程度升高。

据图 10 可知,水位骤降速率与堆积体稳定系数日增量成负相关关系,水位降速越大,稳定系数日增量越小(其绝对值越大),其相关函数类型为二次抛物线:

$$\Delta K = -0.0004V^2 + 0.0015V - 0.0078 \quad (1)$$

式中: ΔK 为稳定系数日增量; V 为水位降速, m/d 。

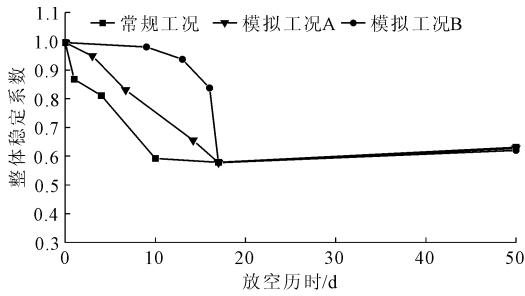


图 9 各工况堆积体稳定系数与历时关系曲线图

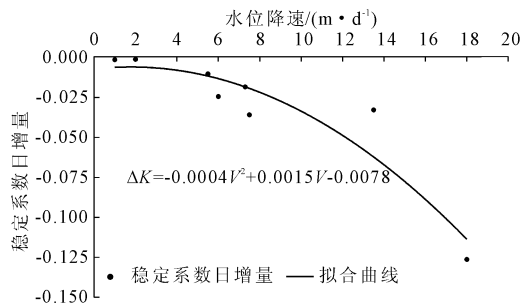


图 10 堆积体稳定系数日增量与水位降速关系曲线图

常规放空工况历时 1 d、4 d、10 d、17 d、50 d 对应总水头及渗流场云图见图 11—图 15。由图可知,坡内流场矢量集中于渗透系数相对较大的碎砾石层及坡脚附近一定范围内的碎块石土夹砂卵砾石,构成了堆积体的主要渗流通道。分析可知,水位下降速率越快,坡内浸润线降低幅度越小,内外总水头差越大,渗流力越大,堆积体稳定性越差;水位下降速率越慢,坡内浸润线降低幅度越大,内外总水头差越小,渗流力越小,对堆积体稳定性的影响越小。

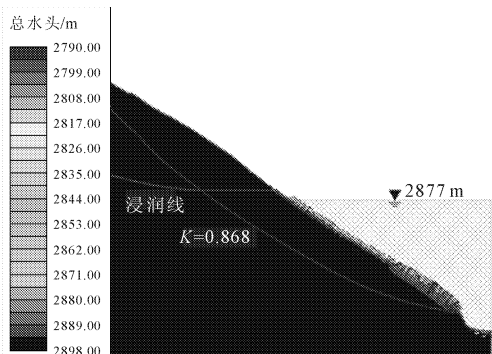


图 11 常规放空历时 1 d 时总水头渗流场云图

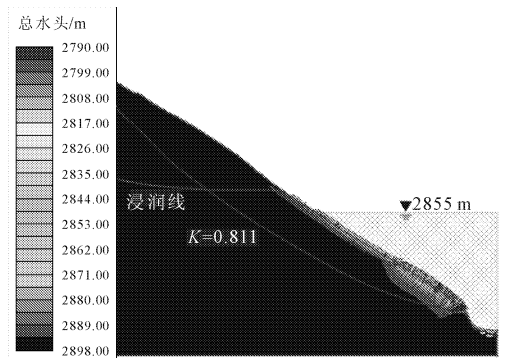


图 12 常规放空历时 4 d 时总水头渗流场云图

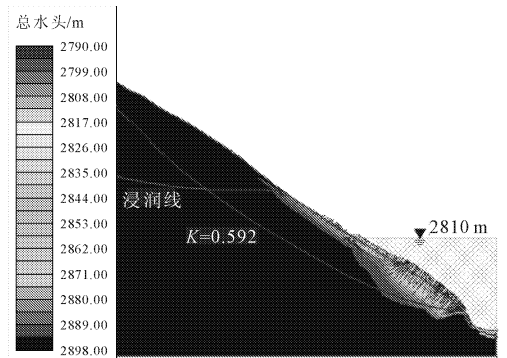


图 13 常规放空历时 10 d 时总水头渗流场云图

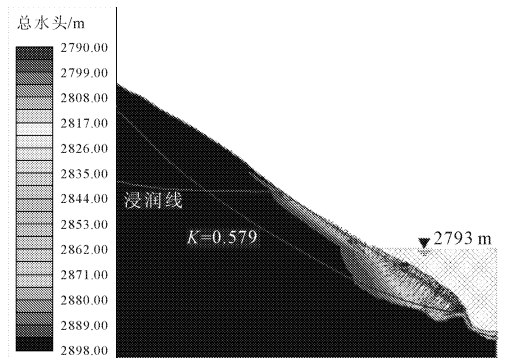


图 14 常规放空历时 17 d 时总水头渗流场云图

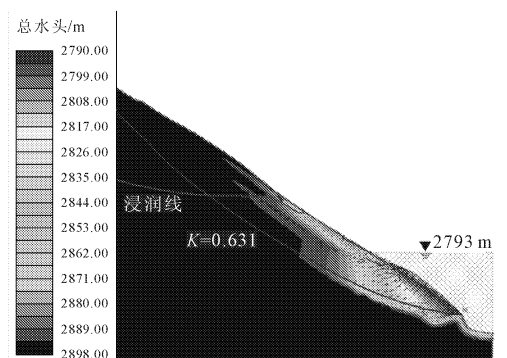


图 15 常规放空历时 50 d 时总水头渗流场云图

5 结 论

(1) 澜沧江河谷两岸巨型堆积体广泛发育,其成因主要受河谷演化、构造切错、岩体风化卸荷、河流改造等因素影响,本文所述巨型堆积体的形成机制主要分为崩塌堵江、冲堆平衡、间歇堆积、河谷再下切等四个阶段。

(2) 运用刚体极限平衡法、有限元强度折减法模拟分析显示,当蓄水位上升至 2 815 m 左右时,堆积体前缘浸水区首先发生局部圆弧型滑塌,并逐渐向后发展,当蓄水位上升至 2 880 m 左右时,堆积体中后部将沿碎石层内部发生折线型深层滑移,随着水位继续上升至 2 895 m 左右时,堆积体沿基覆界面整体处于欠稳定状态,此时堆积体主要变形模式为中后部推移型。

(3) 运用基于饱和非饱和理论的有限元法进行堆积体地下水渗流分析显示,各水位骤降工况下,堆积体均将发生整体失稳。随着水位的下降,堆积体稳定系数先降后升,但水位总降幅及总历时一定时,堆积体稳定系数总减小量基本相当。水位骤降速率与堆积体稳定系数日增量成负相关关系,其相关函数类型为二次抛物线:

$$\Delta K = -0.0004V^2 + 0.0015V - 0.0078$$

(4) 坡体中部碎砾石层及坡脚附近碎块石土夹砂卵砾石层,构成了堆积体的主要渗流通道。水位下降速率越快,坡内浸润线降低幅度越小,内外总水头差越大,渗流力越大,堆积体稳定性越差;反之,水位下降速率越慢,对堆积体稳定性的影响越小。

参考文献:

- [1] 黄润秋,许 强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [2] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [3] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):434-454.
- [4] 刘才华,陈从新,冯夏庭,等. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):769-773.
- [5] 罗红明,唐辉明,章广成,等. 库水位涨落对库岸滑坡稳定性的影响[J]. 地球科学,2008,33(5):687-692.
- [6] 刘新喜,夏元友,练 操,等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1427-1431,1436.
- [7] 唐晓松,郑颖人,唐辉明,等. 水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(5):940-947.
- [8] 邓宏艳. 大型水电工程区库岸滑坡形成机理与水作用影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
- [9] 周家文,陈明亮,李海波,等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报,2019,27(5):1131-1145.
- [10] 赵瑞欣,殷跃平,李 滨,等. 库水波动下堆积层滑坡稳定性研究[J]. 水利学报,2017,48(4):435-444.
- [11] 乔 鹏,孟铭杰,邓 辉,等. 澜沧江上游梅里石 3 号巨型古滑坡成因机制研究[J]. 水利水电技术,2017,48(4):124-130.
- [12] 周 鑫. 金沙江上游茂顶河段滑坡成因机制及敏感性研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [13] 马宗源,任 劼,党发宁,等. 基于双剪理论的饱和/非饱和渗流边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):154-158,162.
- [14] 李永亮,周国胜,李永鹏. 有限元强度折减法边坡失稳判据的适用性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):125-129.
- [15] 李建伟,洪振国. 基于 SSP 地震散射剖面方法的水电站高边坡地质勘测[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):221-225.
- [16] 张 涛,张 慧,黄文雄. 坡面水位下降对非饱和土质边坡稳定性影响的有限元分析[J]. 重庆大学学报,2020,43(6):12-20.
- [17] 黄盛锋,陈志波,郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):35-40.
- [18] 史丁康,许万忠,熊茹雪. 库水位升降对边坡稳定性影响研究综述[J]. 中国水运,2019,19(8):241-243.
- [19] 林 珊,郭昱葵,孙冠华,等. 边坡稳定性分析的虚单元强度折减法[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3429-3438.
- [20] 毛昶熙,段祥宝. 关于“论土骨架与渗透力”的讨论[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):385-386.
- [21] 丁洲祥. 渗透力概念的力学分析及广义化探讨[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):2088-2101.