贵州安顺新场河水库滑坡成因与变形趋势分析

吴仕军,刘　垚,夏　敏

(贵州省地质矿产勘查开发局 112 地质大队, 贵州 安顺 561000)

[摘　要]本文以新场河水库滑坡为研究对象,在野外勘查、探明滑坡地质条件和变形特征的基础上,对新场河水库滑坡的成因进行了分析,根据土体压缩特性和固结原理,参照地基变形计算方法,对滑坡稳定性及未来的变形发展趋势进行了评价。研究表明,具备顺层地质条件的库岸斜坡,在库水位升降和降雨联合作用下,即使没有很好的临空滑移条件,斜坡体也会产生蠕滑变形,其变形量的大小与坡体组成物质的压缩性有关。分析研究可为同类水库滑坡防治及安全运行提供借鉴。

[关键词]水库滑坡;成因机理;固结原理;稳定性分析;变形趋势

[中图分类号]P642.22　[文献标识码]A　[文章编号]1000-5943(2023)03-0296-07

1　引言

滑坡地质灾害是贵州主要灾种之一,也是水库库区多发的地质灾害类型,开展水库库区滑坡成因机制研究具有重要的理论意义和工程应用价值(李长冬等,2020)。新场河水库右岸斜坡为顺层结构,坡体平缓且岩层倾向大于斜坡坡度,不具备滑坡临空条件。滑坡是如何产生、对水库安全运行有什么影响、是否需要进行治理及如何治理等问题急待解决。为判定滑坡对水库安全运行影响,确定合理防治措施,降低水库建设成本,全面了解滑坡的成因机制及其未来发展变化趋势则显得尤为重要。

滑坡的成因一般为坡体自身具备滑移地形地貌条件,在自然或人为作用下使坡体出现有效临空面、易滑岩组及软弱结构面三个条件而诱发,与坡体内水的关系最为密切。如青海循化县查汗都斯水库滑坡形成条件是流水的侧蚀作用使斜坡形成较大的临空面,降水入渗致使泥岩软化造成坡体失稳(张淼等,2014);西藏樟木滑坡和 6·28 关岭县大寨滑坡则是特殊的岩土组合及暴雨的作用使软弱结构面有效应力降低是滑坡产生的主要因素(李云贵等,1995;易连兴,2020);兴仁县罗马山滑坡采用 InSAR 技术对滑坡进行变形监测分析,发现降雨量与形变的高度相关性(章彭等,2020);王正宇等(王正宇等,2021)基于 Green-Ampt 入渗模型对滑坡进行渐进破坏分析,认为强降雨作用使滑坡前缘土体及中前部土体局部破坏后逐步发展为整体破坏;向家坪滑坡对顺层缓倾型水库滑坡同时考虑了库水位升降、降雨及汛期等诱发滑坡多种关键因素条件(杜锋等,2018),为库水位诱发滑坡成因机理进行了补充。

本文通过新场河水库滑坡的详细勘查,基于土体压缩特性和固结原理,参照地基变形计算方法,研究其滑移成因机理,判断其稳定性和变形发展趋势,为滑坡的防治和水库安全运行提供借鉴。

2　研究区概况

2.1　水库工程概况

新场河属珠江流域西江水系,为北盘江打帮

[收稿日期]2023-04-12　[修回日期]2023-06-26
[基金项目] 贵州省安顺市科技计划项目(安市科工【2021】03 号)资助。
[作者简介]吴仕军(1970—),男,贵州安顺人,注册岩土工程师,高级工程师,主要从事水工环地质与岩土工程技术工作。E-mail:447046766@qq.com。

河支流王二河的左支流,水库位于贵州省安顺市西秀区南西面新场乡平桥村,距安顺市区 25 km,地理位置东经 106°11′,北纬 25°35′。水库建设始于 2010 年初,至 2017 年 6 月全部建成完工。水库大坝坝址建于新场河中下游,设计正常蓄水位 1 185 m,相应库容 1 228.5 万 m^3;校核洪水位 1 188.81 m,总库容 1 651 万 m^3。建设期间在其右岸顺向坡体上修建有公路及办公楼等建构筑物,对部分挖填方工程边坡进行了支挡,局部和整体均未出现有滑坡变形迹象。2018 年 6 月,在水库初次试蓄水及放水期间,距大坝南东侧约 400 m 处库区右岸斜坡地带产生滑动,致使建于斜坡平台处的水库管理处办公楼基础、墙体、地面、围墙及办公楼侧面混凝土挡墙出现开裂破坏,进坝公路出现拉裂变形,严重威胁水库管理职工及进坝公路过往车辆、行人的人命财产安全。

2.2　研究区地质环境条件

研究区属侵蚀中低山地貌,总体地势南高北低,海拔高程 1 150～1 300 m,相对高差 150 m,山体坡度一般 30°～50°,植被一般发育。滑坡区位于河道拐弯处斜坡下部圈椅状较平缓地带,原始坡体为梯级耕种的多级平台缓坡,现因修建水库进坝公路及管理房和临时堆料场等进行开挖回填工程使斜坡变成三级缓坡平台。

根据地质调查,滑坡区出露地层为三叠系中统边阳组(T_2b),由青灰、灰黄色薄至中厚层砂质泥岩、泥质砂岩、页岩及粘土岩构成,厚度大于 250 m。区域断裂构造不发育,滑坡区位于新场河背斜倾伏端北东冀,节理裂隙较发育,岩体较破碎,岩层基本与坡体同向,为顺坡向,产状为 72°∠23°。

区内水文地质条件简单,坡体地下水主要为赋存于第四系(Q)松散层中的孔隙水及三叠系中统边阳组泥岩、泥质白云岩的基岩裂隙水,富水性弱。滑坡区前缘发育有一条季节性冲沟,大气降水一般顺地表坡向往冲沟流动,最后汇入前方新场河,少部分渗入坡体补充地下水,沿岩层倾向总体由南向北方向径流,以向下游河床排泄为主,部分以泉点方式进行排泄,地下水位与河流水位基本相同。

2.3　滑坡变形特征

滑坡位于库区右岸斜坡中下部,海拔高程在 1 150～1 205 m 间,相对高差约 55 m,平面呈圈椅状,由三级平台组成。滑坡后缘裂缝呈弧形,变形区域纵坡长约 120 m,横宽约 150 m,平均厚度约 6.0 m,体积约 10.8 万 m^3,滑动方向与岩层倾向同向,约北东向 46°(如图 1)。滑坡变形产生于水库试运行蓄放水期间,其主要变形破坏发生在滑坡后缘,裂缝呈连续拉裂下错现象,裂缝宽 5～30 cm,下错高 3～15 cm,最大可视深度 60 cm,贯穿水库办公区域,造成办公大楼基础错断、地板及墙体拉裂形成危房,进坝公路、围墙及排水沟变形破坏。

根据地表出露及勘探(钻探、槽探)成果,滑体物质由上至下为①灰褐色人工填土,主要成分为碎石土,碎石含量 51%,呈碎块状、菱角状,结构松散,粒径 2～4 cm;②黄褐色粉质粘土,可塑至硬塑状,以粘粒及粉粒为主,含少量高岭土;③灰色强风化粉砂质泥岩。滑带明显,为厚度约 0.5 cm可塑至软塑状粘土夹层,滑床为黑褐色中风化粉砂质泥岩(如图 2)。

如图 2 剖面所示,滑体空间上由三级台阶组成,可分为三段。上部后缘第一段产生蠕滑变形,出现明显拉张裂缝且贯穿呈弧形,致使水库办公楼基础、墙体变形破坏,为滑坡受牵引段;中部第二段公路侧面可见明显滑面裂缝,但整体或局部未见明显变形破坏,起承上启下作用属主滑段;其下部第三段地形较平坦,未见明显挤压、隆起等变形破坏迹象,对滑坡起抗滑作用属抗滑段。滑动方向与岩层倾向基本一致,属牵引式土体顺层滑坡,目前整体处于蠕滑变形阶段。

3　滑坡成因分析

新场河水库大坝及附属办公楼等设施于 2017 年 6 月全部建成完工,期间坡体并未出现滑坡变形迹象。水库于 2018 年 3 月初开始试蓄水,库水位逐步抬升至 5 月中旬到达设计水位,期间未出现滑坡变形迹象。水库于 2018 年 6 月初开始升闸放水至 6 月中旬降到正常河水位,期间有两次较大降雨,在进坝公路和办公楼墙脚开始出现细小裂缝,随后逐渐增大贯通造成破坏。裂缝未见变化并逐渐趋于稳定之后,于 2020 年再次进行蓄水到达正常设计库水位,滑坡后缘裂缝至今再无变化。从以上滑坡裂缝出现时间分析,水库建设期间,

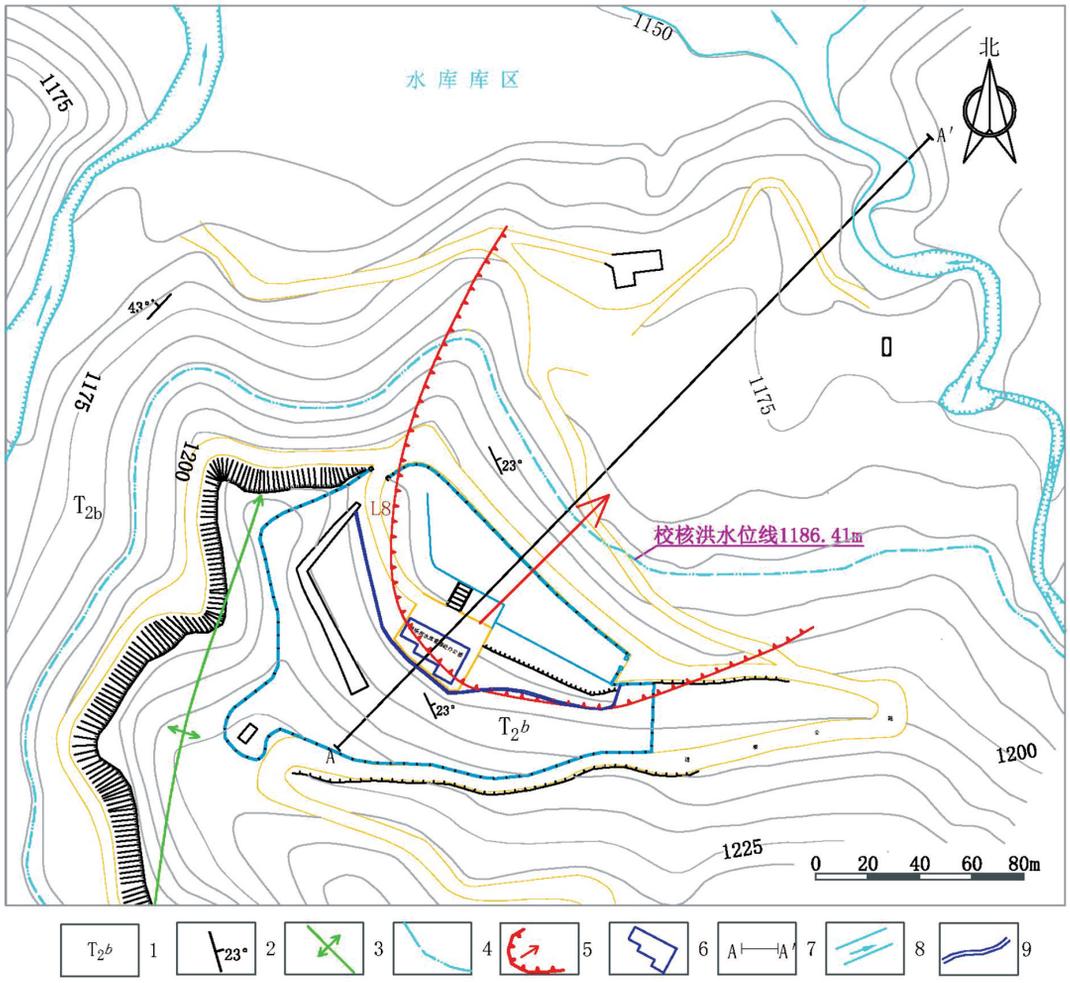

图 1　研究区环境地质图

Fig. 1　Environmental geological map of the study area

1—三叠系中统边阳组;2—岩层产状;3—背斜;4—校核洪水位线;5—滑坡周界及方向;7—剖面线及编号;8—季节性冲沟;9—截排水沟

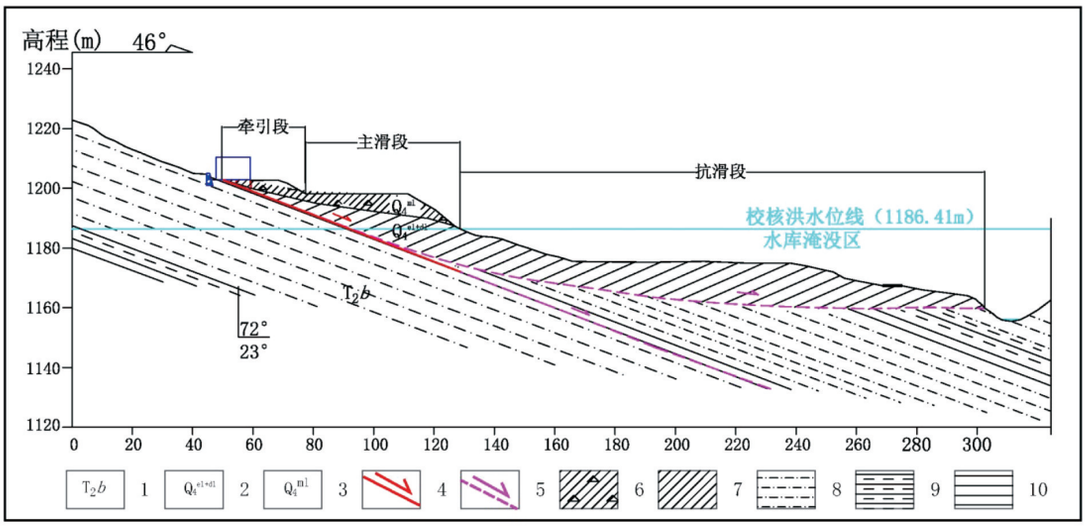

图 2　研究区地质剖面图

Fig. 2　Geological profile of the study area

1—三叠系中统边阳组;2—第四系残坡积层;3—第四系人工填土层;4—滑动面;5—潜在滑动面;6—碎石土;7—粉质粘土;8—粉砂质泥岩;9—泥质砂岩;10—页岩

滑坡体上建筑加载、公路开挖以及建设切填方等活动均未产生变形,滑坡产生裂缝主要在水库放水后时段,两次暴雨入渗使裂缝扩大并贯通,之后趋于平稳再无变化,即便再次进行蓄水到达最高水位线,滑坡体后缘裂缝仍未发生变化,说明滑坡体变形破坏是在水库放水和暴雨入渗产生的作用力下发生的。

通常情况下,滑坡须具备三个基本条件:有效临空面、易滑岩组和软弱结构面。从前述该滑坡体特征及时空分析来看,该斜坡具备易滑岩组和软弱结构面,但未具备有效临空面,其主滑段和抗滑段均未发生可见的明显变形破坏痕迹。根据土体通常具备压缩性原理,笔者认为滑坡前缘阻滑段土体在库水及暴雨作用下产生的附加应力,使其正常固结或欠固结土体首先产生了压缩变形,从而使其后方土体具备了有限的滑移空间。

根据土的压缩性和固结理论,受库水淹没段斜坡上土体在库水作用下产生附加应力,其顺坡向必然产生一定应变,变形大小取决于土体先期固结程度和附加应力的大小。本文参照《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011 对淹没段土体进行变形量计算。

假设顺坡向附加应力为 P,取可压缩土体长度为 H,土体综合压缩模量为 Es,则土体最终变形量可由下列公式计算得出:

$$\triangle H=\frac{P}{E_S}\times L$$

其中:$P=\gamma h\times\sin\theta$—库水下降后由于饱水土体滞后消散而产生的动水压力在顺坡向的分力;

L—取河面以上至库水淹没段可压缩土体有效长度;

Es—经室内试验得出的土体综合压缩模量。

各参数计算取值如下表:

表 1　各参数计算取值表

Table 1　The calculated value of each parameter

参数	P	L	Es
单位	MPa	m	MPa
取值	0.26	50	20

注:以上计算仅依据土体压缩性和固结原理进行的粗略计算,产生附加应力的大小、可压缩土体的计算长度以及现场复杂性均未准确考虑周全,有待进一步深入研究。

经计算滑坡前缘抗滑段土体压缩变形量可达 0.65 m,与滑坡后缘实际变形量基本相符。

综上所述,滑坡形成的主要成因机理可以概括如下:①斜坡上为第四系松散岩土体及强风化粉砂质泥岩,顺层结构并含薄层可塑至软塑状软弱粘土夹层为滑坡提供了良好的物质结构条件;②水库试蓄水并放水期间,水库蓄水引起滑体中地下水位升高,静水压力增大,水库放水又引起地下水位骤降,在滑体中产生向库区的动水压力(相当牵引力),使斜坡上淹没段(抗滑段)土体内部产生附加应力而在顺坡向首先发生压缩变形,从而为其后方土体提供了有效的滑移空间(临空面);③暴雨入渗后缘裂缝使后续坡体主滑段、牵引段滑带充水,滑带土力学强度(C、φ)降低进一步增加了土体的下滑力(相当于加载),当坡体抗滑力小于下滑力时,斜坡上的土体失去平衡整体向下挤压变形而产生破坏。

4　滑坡稳定性及变形趋势分析

4.1　滑坡稳定性评价

稳定性评价及未来变形趋势是滑坡预防与预警工作的首要前提,如何进行有效治理是研究的最终目的,多名学者的研究为本文提供了很好的借鉴。苏培东等(苏培东等,2023)按结构面特征、坡体位置和滑体物质成分进行库岸斜坡分区的原则提出了库岸滑坡稳定性计算修正传递系数法;高明等(高明等,2022)针对水库型滑坡特殊地质条件,选取结构特征、地质构造、变形特征、水文条件作为稳定性评价指标建立了稳定性模糊综合评价模型;朱冬林等(朱冬林等,2002)考虑地下水渗透的滞后性,预测了未来蓄水及潜在的库水位下降情况下滑坡稳定性与库水位的关系;李秀珍等(李秀珍等,2006)基于滑坡多年的变形监测资料,利用灰色 GM(1,1)模型预测了滑坡的变形发展趋势;肖先煊等(肖先煊等,2002)以三峡库区簸箕石滑坡为研究对象,定量研究了滑坡变形特征,为预警预报提供科学依据;唐晓松等(唐晓松等,2013)基于数值极限分析方法对水位下降过程中滑坡体的变形特征和稳定性的动态变化规律进行了研究;邓荣贵等(邓荣贵等,2005)通过对四川宝珠寺水库滑坡的特征分析,对其稳定程度进行了分区和评价;张玉民(张玉民,2013)在水库滑坡稳定性分析基础上进行加固设计研究,为水库滑坡

治理提供了很好的借鉴;而陈悦丽等(陈悦丽等,2016)建立的降雨型滑坡的集合预报模型和施斌等(施斌等,2022)在岩土体灾变光纤感知理论和技术方面取得的成果为深入认识滑坡成灾机理提供了更多研究空间。

现今滑坡稳定性计算软件(王康年等,2021)为滑坡稳定性评价提供了很大的便利。本文依据现场勘查及滑坡成因机理分析结果,采用顺层直线滑移(如图 3)和沿土岩结合面折线滑移(如图 4)两种模式对滑坡进行稳定性评价。

如图 3 所示,滑坡滑移面为顺层直线型。由于顺层产状大于斜坡坡度,滑坡体滑移不具备有效临空面(剪切口),只要坡体前缘不受破坏或坡体上方没有加载使土体本身产生压缩变形,滑坡体处于稳定状态。

如图 4 所示,滑坡滑移面为岩土结合面的折线型。根据滑坡剖面形态和滑移方向,参照《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013. 2014 和《滑坡防治工程勘查规范》GB/T32864-2016. 2016,采用折线滑动法对其进行稳定性分析评价。

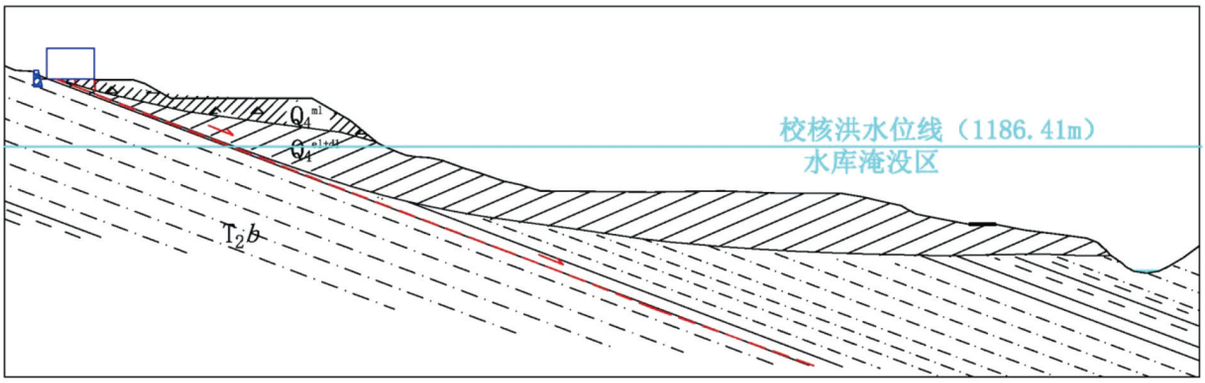

图 3　顺层直线滑移分析图

Fig. 3　Analysis diagram of linear slip along the layer

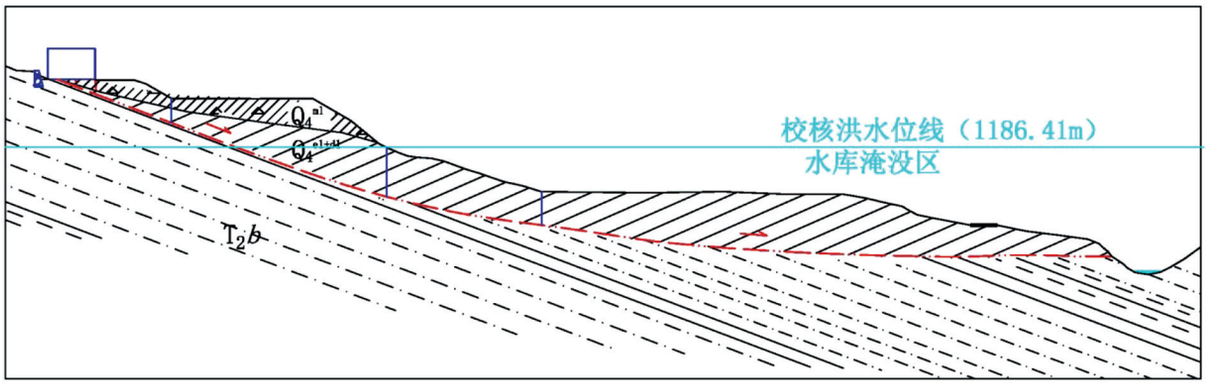

图 4　折线滑移计算分析图

Fig. 4　Analysis chart of polyline slip calculation

表 2　软弱结构面参数选取表

Table 2　Selection table of the parameters of the weak structure surface

软弱结构面	内聚力 C(KPa)	内摩擦角 φ(°)
正常	18	10
饱和	10	7

表 3　滑体重度综合取值表

Table 3　Comprehensive value table of sliding weight degree

土体类型	天然	饱和
人工填土	17. 0	18. 1
粉质粘土	18. 8	19. 8

表 4　滑坡计算评价结果表

Table 4　Table of calculation results of landslide section

滑移面	计算方法	工况	稳定系数	结果分析
土岩结合面	折线滑动法	正常	3. 15	稳定
		暴雨+库水压力	1. 58	稳定

以上计算参数依据勘查试验数据结合经验综合取值,同时考虑库区最高水位骤降及暴雨入渗后缘裂缝产生的动水压力对滑坡体的作用力。通过滑坡计算分析,正常情况和暴雨+库水压力工况下,滑坡体处于稳定状态。

4.2　滑坡变形趋势分析

根据以上滑坡稳定性计算和分析,正常情况下,滑坡处于稳定状态;即使在暴雨加库水作用下,滑坡体仍然处于稳定状态。

由于坡体具备易滑岩组和顺坡向软弱夹层,在水库再次放水产生动水压力或外在地质营力(如地震等)作用下,不排除斜坡体仍然有进一步产生滑移变形的可能。由于前缘抗滑段土体已经产生一次固结压缩变形,坡体上不增加较大附加荷载前提下,其再次产生压缩变形量有限,滑坡体不会出现顺坡向整体滑入库区产生破坏的可能,水库的安全运营将不会受到影响。

5　结论及建议

通过对新场河水库滑坡定性与定量分析,可以得出如下结论:

(1)存在易滑岩组和软弱结构面的库区顺层斜坡,在没有临空面(剪出口)情况下,起抗滑作用土体在库水压力(附加应力)作用下将产生固结压缩变形,变形量的大小与其组成物质的压缩性有关。

(2)新场河滑坡是在库区放水和暴雨入渗产生动水压力双重作用下而发生,目前处于稳定状态。坡体在附加地质营力(加载、库区放水、地震等)作用下,其抗滑段土体仍然可以产生压缩变形,但其变形量有限,不会出现顺坡向整体滑入库区而产生整体破坏,水库的安全运营将不会受到影响。

(3)滑坡的成因机理除需进行常规宏观力学分析外,对其物质组成的岩土体性质特征微观影响还有待进一步研究。

鉴于滑坡变形所造成的破坏特征以及今后须保护对象,滑坡防治建议如下:

(1)在滑坡体抗滑段受水库淹没线附近部位设置抗滑结构,防止坡体再次滑移产生变形破坏。

(2)对已经受破坏水库办公楼地基及基础进行加固和墙体维修,使构筑物结构整体安全达到入住办公条件。

(3)滑坡体上设立长期监测系统,编制应急预案,为今后收集监测运行资料进行研究的同时确保水库运营安全。

[参考文献]

陈悦丽,陈德辉,李泽椿.2016. 降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J]. 大气科学, 40(3):515～527.

邓荣贵,付小敏,邓林. 2005. 四川宝珠寺水库滑坡地质灾害及典型滑坡特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 32(5):518-524.

杜锋,许模,肖先煊,等. 2018. 顺层缓倾型水库滑坡稳定性物理模拟试验研究——以向家坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 26(3):694-702.

GB50007-2011. 2014. 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社.

GB50330-2013. 2014. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社.

GB/T32864-2016. 2016. 滑坡防治工程勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社.

高明,贺可强,刘洪华. 2022. 基于变权重的水库滑坡稳定性模糊综合评价[J]. 科学技术与工程,22(10):3885-3891.

李云贵,温清茂. 1995. 西藏樟木滑坡变形机理与趋势分析[J]. 水文地质工程地质,(5):32-35.

李秀珍,孔纪名,王震宇. 2006. 石榴树包滑坡变形监测及演化趋势分析[J]. 工程地质学报,14(3):320-326.

李长冬,龙晶晶,姜茜慧. 2020. 水库滑坡成因机制研究进展与展望[J]. 地质科技通报,39(1):67-77.

施斌,朱鸿鹄,张诚成. 2022. 岩土体灾变感知与应用[J]. 中国科学:技术科学.

苏培东,严磊,邱鹏. 2023. 考虑水库岸坡特征的滑坡稳定性计算修正传递系数法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 34(1):40-48.

唐晓松,郑颖人,唐辉明,等. 2013. 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, 35(5):940-947.

王正宇,樊辉. 2021. 降雨诱发浅层滑坡渐进破坏分析研究[J]. 贵州省地质, 149(4):443-448.

肖先煊,许模. 2002. 水库滑坡变形特征的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质,41(5):107-112.

王康年,王云,黄烨,等. 2021. 一种新的滑坡稳定性计算软件的结构设计[S]. 贵州地质,148(3):320-325.

易连兴. 2020. 西南岩溶山区复合水动力场滑坡影响模式—以关岭县大寨滑坡为例[J]. 水文地质工程地质, 47(4):43-50.

朱冬林,任光明,聂德新,等. 2002. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程地质,(3):6-9.

张玉民. 2013. 水库滑坡的稳定性分析及加固设计研究[J]. 太原理工大学学报, 44(5):660-663.

张淼,张春山,杨为民,等. 2014. 青海循化县查汗都斯水库滑坡形成条件与稳定性分析[J]. 地质力学学报, 20(3):274-284.

章彭,刘文明. 2020. 兴仁县罗马山滑坡体形变监测及成因分析[J]. 贵州地质, 142(1):94-97.

(下转第 263 页)

ical disaster data, not only is the data redundancy relatively high, but also the error rate is relatively high, which cannot achieve the expected information management effect. Therefore, a GIS based geological disaster data information management system design is proposed. In terms of system hardware, select and design GIS equipment and converters, collect spatial geographic information of geological disaster areas using GIS equipment, and convert analog data into digital data using converters; In terms of system software, hash algorithms are used to identify and delete duplicate data, and geological disaster data is scaled and processed to reduce data dimensions. Database technology is used to standardize storage and management of geological disaster data, thus achieving the design of a GIS based geological disaster data information management system. Through experiments, it has been proven that the data redundancy of the design system is within 0. 1, and the error rate is less than 3% . It has good application prospects in the information management of geological disaster data.

[**Key Words**]　GIS; Geological disaster data; Information technology; Management system; Hash algorithm; Database technology

(上接第 301 页)

Analysis on the Landslide Genesis and Deformation Trend of Xinchanghe Reservoir in Anshun, Guizhou

WU Shi-jun, LIU Yao, XIA Min

(112 *Geological Party*, *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development*, *Anshun* 561000, *Guizhou*, *China*)

[**Abstract**]　In this paper, the landslide of Xinchanghe reservoir is taken as the study object, on the basis of field detailed exploration, measured the geological condition of landslide and deformation feature, the genesis of landslide in Xinchanghe reservoir was analyzed. According to the soil compression characteristic and consolidation principle, with the computing method of foundation deformation, the stability and future deformation tendency of the landslide were discussed. The results shows: under the influence of water level variation and rainfall, even the air slid condition is not so good, the slope withe bedding geological condition will creep deformed, the deformation value is related to the compressibility of the slope constituent materials. The study can afford guidance for landslide prevention and safe management of the similar reservoir.

[**Key Words**]　Reservoir landslide; Mechanism of genesis; Consolidation principle; Stability analysis; Deformation tendency