

文章编号: 1006-6616 (2014) 03-0274-11

青海循化县查汗都斯水库滑坡 形成条件与稳定性分析

张 森^{1,2}, 张春山¹, 杨为民¹, 王秋梅², 刘 玄², 刘 廷²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要: 在开展循化县查汗都斯水库滑坡野外调查及工程地质调查的基础上, 简述了滑坡的发育特征、探讨了滑坡的形成条件, 进行了稳定性分析。研究表明, 地形地貌、地层岩性、地震活动及降水是该滑坡形成的主要因素。本文采用毕肖普法对该滑坡按天然状态和饱水状态两种工况进行稳定性计算, 采用 ANSYS 软件进行二维数值模拟分析, 所有结果均显示该滑坡目前处于基本稳定—稳定状态。建议对滑坡进行必要的监测或群测群防。

关键词: 查汗都斯水库; 滑坡; 形成条件; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

0 引言

水库工程是国民生产建设的重要水利设施, 经常会遇到岸坡稳定性问题。水库库岸边坡稳定性关系到设施本身以及下游人民生命财产安全。水库边坡一旦发生滑坡将会造成巨大的财产损失或人员伤亡。库岸滑坡的危害主要表现为: 大量岩土滑入库内, 减少有效库容, 直接威胁建筑物运营安全; 如果大型滑坡体高速滑入库内, 会产生巨大涌浪, 对大坝也会形成很大的冲击荷载, 导致大坝失事, 给下游人民生命财产带来巨大损失^[1]。例如, 1964年10月9日, 意大利瓦伊昂水库左岸滑坡, 滑体体积约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 冲毁坝体并造成了下游2400余人死亡^[2]。1963年湖南柘溪水电站, 近坝库区右岸发生滑坡, 引起库水涌浪高达21 m, 也造成了严重的事故^[3]。

库岸滑坡的稳定性问题是当今水电工程中的重点研究问题之一。国外开展库岸滑坡调查较早, 如琼斯等在1941—1953年调查了罗斯福湖(大古力水电站)附近发生的滑坡, 其分析结果是: 49%的滑坡发生于蓄水初期, 30%发生于库水位突降10~20 m的条件下。1990年, 中村浩之等^[4]根据一些水库滑坡实例, 通过分析及实测研究, 认为浸水和库水位急剧降低和降雨是库岸滑坡形成的主要因素。在我国, 随着近些年来大量水电站的修建, 人们更

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011220087); 国家科技支撑项目(2012BAK10B03-03); 国土资源部行业公益专项(201211095-3)

作者简介: 张森(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事构造地质与地质灾害研究工作。E-mail: mz0546@163.com

加意识到库岸边坡稳定的重要性,不少学者进行了大量的研究工作,取得了大量的研究成果,主要结论与国外学者基本类似。

查汗都斯水库位于循化县查汗都斯乡政府西南 5 km 处的比塘沟内,地理坐标为:东经 $102^{\circ}16'14''$,北纬 $35^{\circ}49'20''$ 。该水库是在滑坡体上修建的。1961 年 11 月 14 日查汗都斯乡比塘沟左岸发生巨型滑坡,淹没水磨 1 座,死亡 1 人。该滑坡为高速远程滑坡,势能较大,滑体大部完整,滑体前缘滑到沟对岸后返回堆积阻塞比塘沟,形成堰塞湖。1962 年滑坡经过人工改造,形成目前的查汗都斯水库,水库蓄水量近 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在水库下游有 11 个自然村,977 户近 7500 人以及 800 hm^2 (12000 亩)农田及林地。因此,开展查汗都斯水库滑坡的稳定性分析评价,对查汗都斯地区的国土资源开发和规划、保持社会稳定有重要意义。

本文主要采用极限平衡法中的毕肖普法对查汗都斯水库滑坡进行稳定性评价。该方法是在考虑土条之间的水平作用力的基础上,对滑坡稳定性进行定量分析。其主要优点是计算简单,计算精度高,但该方法必须经过大量试算,过程较为繁琐。另外采用 ANSYS 软件进行二维数值模拟分析,验证计算结果。

1 滑坡区域地质背景及发育特征

1.1 区域地质背景

查汗都斯水库位于循化县西北部查汗都斯乡,循化县南北分别由拉鸡山南断裂及西秦岭北缘断裂控制^[5]。该地区自第四纪早期以来以震荡式上升运动为主,形成了循化盆地,在后期的水蚀及其他动力作用下,形成了现今的构造地貌条件。这些都为崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的发生提供了良好的物质基础及形成条件。循化县地区地质灾害危险性指数为 0.3417,属较低危险程度地区^[6]。

该地区地震活动较少,根据青海省地震目录统计,自公元 373 年来。该县共发生 6 次大于 2.0 级的地震,其中最强的一次为 4.0 级^[7]。但其周边地震活动比较强烈,如在研究区西部约 200 km 的共和县塘格木镇 1990 年曾发生 7.0 级地震^[8~9]。

1.2 工程地质条件

滑坡区主要出露地层为新近系红色砂和泥岩互层,在河谷中发育第四系松散堆积物。在滑坡体上依据钻孔资料自上至下共发育 5 组地层^[7]:

①碎石土 (Q_4^{d}):颜色为浅红色,较松散,土为黏土,含量约占 25%,砂砾石约占 65%。其次里面夹有大于 10 cm 的卵石,砾卵石成分以砂岩为主,呈灰白色。卵石约占 10%。分布在地表,整体层厚度为 7 m。

②泥岩夹砂砾岩互层 (N):颜色为土红色,因滑动整个地层均较疏松,岩心呈松散状及短柱状,泥岩厚约 30 ~ 80 cm,夹有少量的砂砾,砂砾层厚 0.5 ~ 1.0 m。整体层厚 24.5 m。

③碎石土 (Q_4^{d}):颜色为青灰色,呈米胶结状态,胶结物为黏土,碎石呈棱角状,最大粒径 10 mm 左右,含量约占 60%,黏土质约占 40%。整体层厚 20 m。

④泥岩 (N):颜色土红色,胶结较好,锤击易碎。岩心多量碎块状,含砂,碎石 (64 ~ 68.5 m 段滑坡滑动带)。滑动带向下,成岩性好。岩心呈 20 ~ 30 cm 的柱状,含有 5 ~ 8 mm 的碎石,新鲜面有锈红色斑点,具斜层理,倾角 5° 左右。整体层厚 43 m。

⑤砂砾石 ($Q_4^{\text{d-pl}}$):颜色为紫红色,青灰色。呈米胶结状态,胶结物为黏土,岩心呈松散

状,磨圆度呈次棱角状,卵砾石约70%,中粗砂约占20%,泥质约占10%。整体厚度13 m。

1.3 水文地质

1.3.1 地表水

查汗都斯水库滑坡坡体表面发育大量冲沟。该区多年平均降水量268.7 mm(据循化县气象站1959—2012年资料),夏秋季多暴雨及大雨,且多集中在7—9月。冲沟两侧坡体植被稀少,在强降水作用下,坡体上会形成具有较强侵蚀能力的山洪,最终汇集到比唐沟内。冲沟内水量增加,会不断冲蚀两侧坡体坡脚,增大临空面,导致斜坡失稳,易发生滑坡等灾害。

1.3.2 地下水

该研究区水土流失严重,地形切割剧烈,地下水匮乏。但是由于坡体表面垂直节理裂隙较为发育,从而形成了较为密集的洼地及落水洞。在降雨过程中,坡体表面降水汇集后,将沿着节理裂隙,落水洞等快速入渗。这些入渗的地表水会在新近系泥岩上汇集形成局部上层滞水,并沿泥岩面向沟谷方向流动。这样的地下水活动会降低坡体的强度,改变了坡体的应力状态,导致坡体失稳。地下水活动的影响作用主要表现在:一是斜坡上形成的上层滞水降低了土体强度,增加了土体的重量,易触发斜坡变形失稳;二是在连续降雨过程中或大雨之后,水分入渗途中在下部泥岩或较为完整基岩层受阻,使其上部的岩、土体含水量增大,虽尚未饱和或形成上层滞水,但是,由于含水量增大,降低了土体强度,也同样触发斜坡变形失稳^[7]。

2 滑坡基本特征

查汗都斯水库滑坡位于比唐沟西侧坡体上。比唐沟两侧坡体较陡,陡坎高20~100 m,坡度大于60°,边坡基岩岩性以新近系泥岩和砂砾岩互层为主,形成基岩型滑坡群。该滑坡群在老滑坡前缘又发生了各期活动。西侧滑坡发生过两期活动,先是形成了上游的大水库,然后沿东侧砂岩形成了溢流坝。滑坡后期的二次活动形成了下游400 m处的小水库,目前正在养鱼。查汗都斯水库①号滑坡区域边界明显,两侧以冲沟为界,后缘有陡坎,呈半圆弧状。滑坡主滑方向150°,滑体长1500 m、宽2300 m,平均厚48 m,面积 $233.19 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体残留体积 $1.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡总体地势西高东低,坡体上陡(25°—42°)下缓(15°—29°),整体坡度22°(见图1,图2)。②号滑坡长700 m、宽1200 m、厚40 m,原始坡度32°,滑后坡度24°,滑向100°,高差390 m;③号滑坡长1000 m、宽1800 m、厚60 m,原始坡度35°,滑后坡度27°,滑向310°,高差500 m。本文主要研究①号滑坡的稳定性,它是形成水库坝体的主体。

①号滑坡后壁呈阶梯形,陡坎主要分为2段,上部陡坎坡度85°,高64 m,下部陡坎坡度40°,高280 m,中间夹一宽约120 m平台。陡坎底部发育一宽100 m的以红色黏土为主的泥塘,该泥塘平坦。

①号滑坡为一老滑坡,最早形成时代可能为史前时代,据吴庆龙等^[10]测年资料,可能由于某次地震形成于公元前1730年前后,黄河在积石峡发生过一次严重的堰塞事件,形成了一个湖水体积达 $11.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大型堰塞湖,强烈地震应该是这一堰塞事件发生的触发因素。据此推断,该滑坡规模巨大,也可能是由于本次地震形成的,因为仅仅在河流及降雨条件下很难形成如此大规模的滑坡。而1961年的滑坡活动应是老滑坡体的一次复活活动。

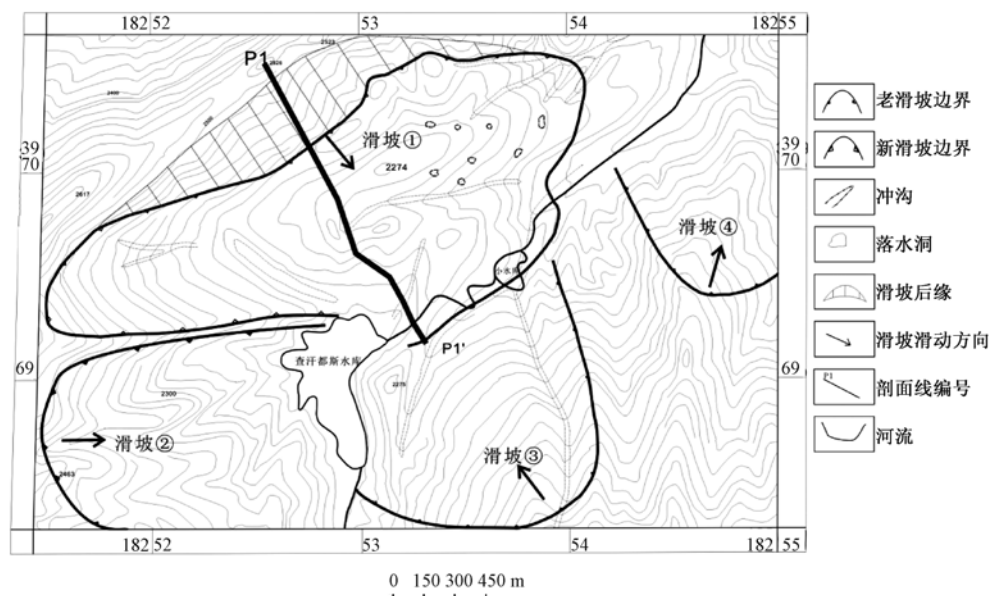


图1 查汗都斯水库滑坡平面图

Fig.1 Planar graph of Chanhandusi Reservoir Landslide

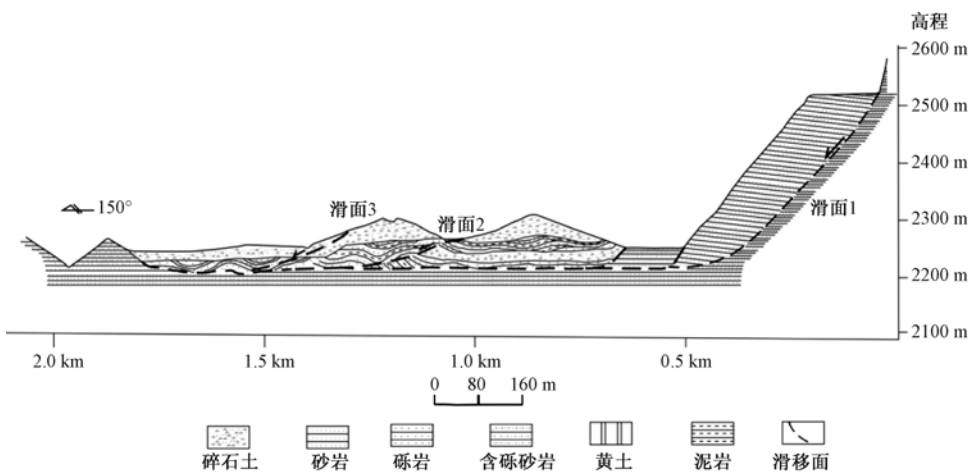


图2 查汗都斯水库滑坡剖面图

Fig.2 Profile graph of Chanhandusi Reservoir Landslide

①号滑坡体上有大量的纵向冲沟发育，冲沟呈“树枝”展布，断面呈“V”字型，沟长均小于500 m，沟谷切割深度为10~35 m，沟内地形破碎。滑体后缘和中部都有明显低洼平地，岩性以Q₄红色黏土为主，表明该滑坡在滑动过程中各位置的滑体滑动速率不同，形成了拉裂槽。在滑坡体有许多孤立的突石，这些孤立的突石也是由于滑体各个位置的滑动速率不同而形成的。坡体表面基本无植被覆盖，只有一些低矮的灌木发育，坡面水土流失严重。

3 滑坡形成条件及机理分析

3.1 地形地貌

发育有高陡边坡和临空面是形成滑坡的基础条件。该滑坡位于循化盆地西南边缘的高山丘陵地区。比唐沟属黄河的一级支流,地貌侵蚀作用强烈。在新构造运动的作用下,比唐沟河流以向下侵蚀作用为主,侧蚀作用为辅。比唐沟在内外综合动力作用下,形成两侧坡体高陡的地形和临空面。此外,支沟两侧坡体在坡面水流的冲蚀作用下,形成较深的冲沟,冲沟的发育也加剧了滑坡的不稳定性。现场调查发现在滑体上局部发育地裂缝和洼地,表明该斜坡为不稳定斜坡,今后仍有可能形成小规模滑坡活动。

3.2 岩土体条件

具有软弱结构面的岩土体是形成滑坡的另一个基础条件。不同的工程岩组决定边坡稳定与否,地层与岩性组合特征不同,其工程地质特性也不相同^[11~12]。查汗都斯水库地区为新近系临夏组砂岩、泥岩互层,该地层为软硬相间的岩体组合类型,抗风化性差,水敏感性高,特别是泥岩遇水后岩体强度大幅度下降^[13]。在水的作用下,该区地层容易形成软弱夹层,属易滑地层。不同岩性强度特征对于边坡变形破坏也有直接影响。

3.3 降水及气候因素

高原地区滑坡的发生与降水及温度相关性较大,降雨可形成滑坡的诱发因素或动力来源^[14~15]。循化县属高原半干旱大陆性气候,具有寒长暑短,日温差大,降水量小,蒸发量大的特点。循化县境内多年平均降水量 268.7 mm,降水量年内主要集中于 5—9 月份,此时段雨强较高、日降雨量大、降雨集中,为地质灾害多发期^[16~17]。查汗都斯水库滑坡最近一次滑动在 1961 年 11 月 2 日,主要是在年内降雨长期积累作用致使泥岩软弱和温差变化较大等多种作用下形成的。2008 年 8 月 20 日及同年 8 月 29 日循化县城降水量分别为 37.4 mm 和 20.8 mm,南山发生泥石流灾害,由此可见该区具有形成泥石流的降水条件。

3.4 断裂构造与地震

断裂构造对地质灾害具有控制作用。首先,断裂构造可以造成岩石破碎,岩体强度降低,稳定性变差,一般地,距离断裂越远,其影响程度也越弱。其次,断裂构造运动控制了研究区盆地地貌的形成,研究区的地质灾害主要发育在盆地的边缘。在距查汗都斯滑坡体约 6 km 处的南部山区发育一条走向北西西向的断裂,控制了循化盆地的南边界,该滑坡体后缘处也发育一条小规模断裂。这些断裂除控制盆地的形成外,主要是造成岩体破碎,降低岩体的强度,这就为滑坡灾害的形成奠定了物质基础。

强烈的构造活动可以诱发地震。地震时由于水平地震力的作用,使滑坡体法向压力削减,下滑力增强,促使滑坡易于滑动。此外,地震的震动促进坡体中的裂隙扩展,使岩土体结构破坏,容易沿原有的软弱面或新产生的软弱面滑动。据《1:400 万中国地震参数区划图》(GB 18306-2001),循化县地震动峰值加速度为 0.10 g,相应的地震基本烈度为Ⅶ度。同时根据青海地震目录统计,该地区自公元 373 年以来,并无大地震,大于 2.0 级地震共 6 次,最大一次为 4.0 级。因此现今条件下地震因素对查汗都斯水库滑坡的影响较小。

3.5 形成机理分析

综上所述,查汗都斯水库滑坡形成机理为:比唐沟左岸高陡边坡体在坡脚处不断受到流水的侧蚀作用形成较大的临空面,同时坡体也在自身的重力作用下不断变形,坡脚处应力集

中急剧增加变大；此外，垂直节理裂隙发育的坡体在降雨入渗及冻融作用下，加大了坡体的自身重力和降低了坡体的稳定性，降水入渗到泥岩时就会顺层向下流动，致使泥岩软化，强度降低，在坡体内部形成了软弱带；当岩土体在自重和其他动力作用下超过岩土体的极限抗剪强度时，岩土体就会沿着软弱带或应力集中区贯通，造成坡体失稳，岩土体在坡脚临空面处剪出，形成滑坡。该滑坡体在下滑过程中冲到河谷对岸并形成了反向堆积，堵塞比唐沟，形成了堰塞湖。

4 滑坡稳定性分析评价

本文主要采用 Bishop 法对查汗都斯水库滑坡进行稳定性计算，同时也用其他计算方法如 Janbu 法进行了计算，并将结果进行对比分析，采用 ANSYS 软件进行二维数值模拟分析。

4.1 极限平衡法稳定性评价

4.1.1 计算方法

本文首先采用极限平衡法进行稳定性计算。依据滑坡剖面，按天然、饱水两种工况分别计算稳定系数。边坡的稳定计算采用 Bishop 法在 Geostudio 软件上的 Geo-slope 模块进行实施^[18-19]。

4.1.2 计算原理

Bishop 法是条分法的一种，它考虑了土条侧面的作用力，并假定各土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相等，即等于整个滑动面的稳定系数。其计算公式如下：

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta_i}} [c'b + (W_i - u_i b + \Delta X_i) \tan \varphi']}{\sum W_i \sin \theta_i}$$

式中 F_s ——稳定性系数； W_i ——土条 i 自重， kN/m^3 ； $u_i b$ ——孔隙水压力， kPa ； θ_i ——土条底部中点与滑弧中心连线垂直夹角， $(^\circ)$ ； c' ——内聚力， kPa ； φ' ——内摩擦角， $(^\circ)$ ；

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi'}{F_s} \sin \theta_i。$$

4.1.3 计算结果

本文按天然状态和饱水状态 2 种工况条件分别进行了稳定性计算。本次计算对滑坡的 P1—P1' 剖面线（见图 1）进行滑坡稳定性计算。滑体土及滑带土的物理力学参数主要来源于室内测试结果（见表 1，表 2）。

表 1 滑体土及滑带土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the landslide soil and slip soil

	比重	孔隙比	天然含水量/%	干重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
滑体土	2.71	0.78	11.90	15.2	17.1
滑带土	2.68	0.45	7.07	18.5	19.4

表 2 滑体土及滑带土物理学指标

Table 2 Physical indexes of the landslide soil and slip soil

	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		内聚力 C/kPa	
	固结快剪	饱和固结快剪	固结快剪	饱和固结快剪
滑体土	29.0	28.0	8.5	7.0
滑带土	27.5	20.4	9.3	6.7

根据现场勘察以及钻探数据,该滑坡主要有3个不稳定滑面,因此分别对于3个滑面按天然状态和饱水状态2种工况条件进行了稳定性计算(见表3,表4)。经过计算,在天然状态下,该滑坡体3个滑面均处于稳定状态;在饱水状态下,该滑坡体处于基本稳定—稳定状态。其中后缘处的滑面1稳定系数为1.099,处于基本稳定状态,中前部的滑面2和滑面3仍处于稳定状态(见图3)。

表 3 自然状态(工况1)下稳定性计算结果
Table 3 Stability calculation result under natural state

滑面/ F_s	Bishop	Janbu	Morgenstern-Price	稳定状态
1	1.277	1.125	1.220	稳定
2	6.042	5.443	5.818	稳定
3	4.784	4.182	4.777	稳定

表 4 饱水状态(工况2)下稳定性计算结果
Table 4 Stability calculation result under water saturated state

滑面/ F_s	Bishop	Janbu	Morgenstern-Price	稳定状态
1	1.099	0.934	1.073	基本稳定
2	4.800	4.400	4.806	稳定
3	4.784	3.394	3.864	稳定

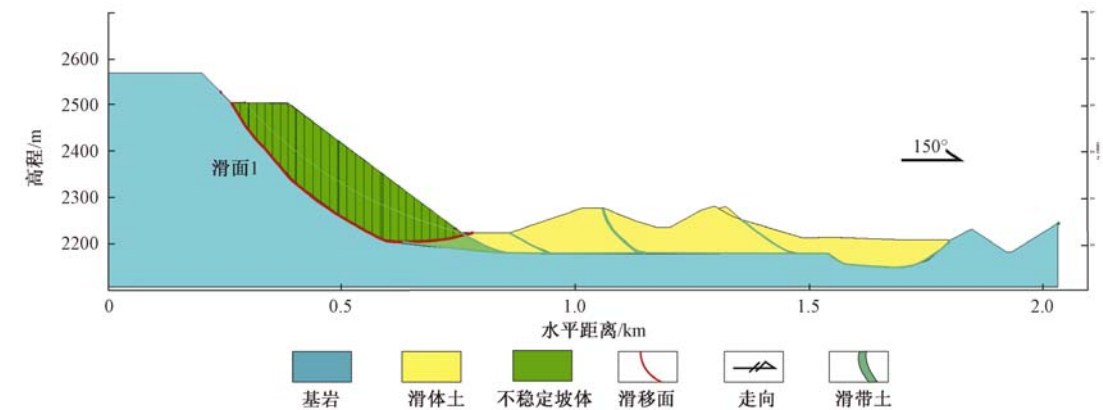


图 3 滑面1 计算结果
Fig. 3 The result of slip surface 1

4.2 有限元模拟分析评价

为了验证极限平衡法准确与否,本文采用 ANSYS 软件进行二维数值模拟分析。

4.2.1 有限元模型的建立

依据前述滑坡体结构模型中滑坡的滑面和岩性分布建立模型格架。在 ANSYS 软件上进行自动划分,共划分为 789 个二维计算单元。

4.2.2 岩石力学参数的确定

依据岩石力学实验取得研究区的岩石物理力学参数(见表1,表2)。

4.2.3 边界条件的确定

为了保证模型没有整体的刚性平动和转动,在模型西边界和下边界施加全约束,而东边

界和上部为自由边界；西边界东西向约束，上下自由，下部边界上下约束，东西向自由。

根据研究区的应力资料，在东西方向加载 8.0 MPa 的应力，以达到模型模拟结果与比较合理^[20]。

4.2.4 模拟计算结果

数学模型建立后，运用 ANSYS 软件执行程序计算，以自重力为参考点，经过对边界条件和加力大小进行调试，最终得到模拟计算结果（见图 4，图 5）。

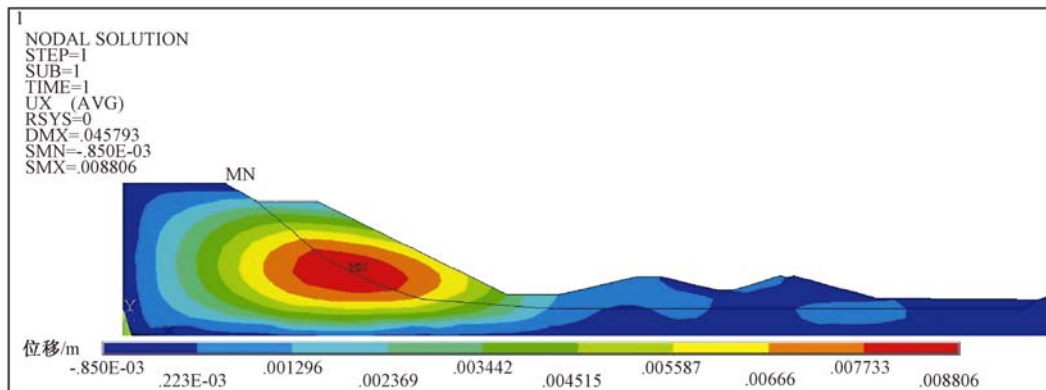


图 4 查汗都斯水库滑坡位移云图

Fig. 4 Displacement nephogram of Chanhandusi Reservoir Landslide

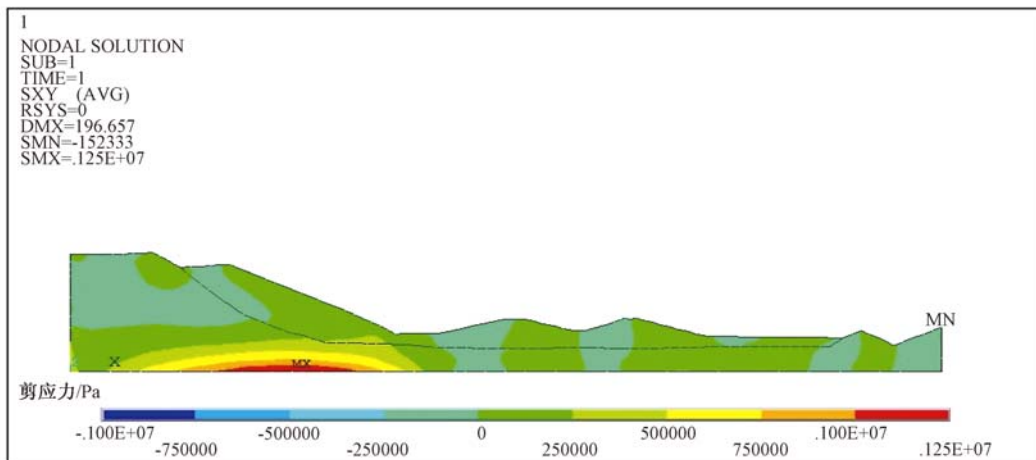


图 5 查汗都斯水库滑坡剪应力云图

Fig. 5 Shear stress nephogram of Chanhandusi Reservoir Landslide

根据有限元方法模拟结果，位移云图显示该滑坡水平方向最大位移处位于后缘坡体，但是其位移量较小，其它部位变形较小。剪应力云图显示该滑坡最大剪应力集中于滑坡体后缘底部，剪应力最大值为 0.25 MPa，坡脚处也不是剪应力集中部位。位移量较小，剪应力在坡脚处无集中现象，这两者都表明滑坡体目前处于稳定状态。

4.3 计算和模拟结果分析

依据毕肖普法对该滑坡进行稳定性计算结果和采用 ANSYS 软件进行二维数值模拟分析结果，并将两结果进行对比分析，所有结果均显示该滑坡目前处于基本稳定—稳定状态，分

析其原因主要有以下几个方面:

①该滑坡受库水位的影响较小。该水库库容相对较小,最大库容达 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$,常年库容为 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,水库水位线较低。而且,库岸边坡受河流流动所产生的侧蚀作用影响较小。水库水体大部分时间处于静止状态,基本对坡体无影响,更不会引起坡面的变形或者诱发滑坡的复活。但在水库坝体处,水对坝体有一定的软化作用,其作用效果较小。

②滑坡体的地貌形态显示前坡体处于基本稳定状态。坡体后缘较陡,其前部地势较为平坦,只有滑坡后缘高陡边坡仍有再次发生滑坡复活的可能。最近一次的复活活动对沟谷进行了较大的改造,形成了约 1 km 的平坦阻滑段,进一步提升了坡体的稳定性。在 2008 年,查汗都斯乡在该水库进行了除险加固工程,大坝坚固程度进一步提高。

③根据图 5 显示的坡体内部的剪切应力分布状况来看,剪应力集中分布于坡体底部,坡体后缘坡脚处并没有出现剪切应力集中现象,其位移量也很小。因此,该坡体状态是稳定的。

④内动力地质作用对滑坡的形成及发展具有重要的影响。根据 1:200000 地质图,查汗都斯水库滑坡距离其南部文都大寺断裂约 6 km,不会受该断裂直接作用影响。同时,该地区地震动峰值加速度为 0.10 g,也无较大地震发生记录。现今内动力对查汗都斯水库滑坡是稳定性影响较小。

5 结论

对查汗都斯水库滑坡的形成条件及机理进行了分析,认为滑坡形成的主要控制因素为地形地貌、地层岩性,主要诱发因素是自重力、降水及人类活动。

按自然状态和饱水状态两种工况条件,采用极限平衡法中的 Bishop 法对滑坡体的稳定性进行了计算。计算结果表明,在饱水条件下滑体后缘滑面 1 的稳定性系数为 1.099,处于基本稳定状态。其他滑面稳定性系数较高,处于稳定状态。因此查汗都斯水库滑坡整体稳定性较高。

运用 ANSYS 软件执行程序对滑坡的稳定性进行了模拟计算,除滑坡后缘坡体临界状态外,其他部位变形较小,坡脚处也没有出现剪应力集中现象,表明该滑坡目前的状态是稳定的。

从水文条件、地形地貌、内动力等方面对查汗都斯水库滑坡体稳定性进行了分析。但坝体处于水库下游,水对坝体具有一定软化的作用。建议对水库坝体进行长期的维护并开展变形监测,对滑坡进行群测群防监测,确保人民生命财产,防患于未然。

致谢 文中所用滑坡体物理力学参数依据青海省地质环境监测总站编写的《青海省循化县地质灾害详细调查报告》中资料,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 牛运光. 浅谈水库库岸滑坡 [J]. 中国水利, 1985, 11: 19~20.
NIU Yun-guang. Research on reservoir landslide [J]. China Water Resources, 1985, 11: 19~20.
- [2] 刘传正. 意大利瓦依昂水库滑坡 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40 (5): 10.
LIU Chuan-zheng. The Vaiont Landslide in Italy [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40 (5): 10.

- [3] 钟立勋. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5 (2): 77 ~ 84.
ZHONG Li-xun. Enlightenments from the accident of Vaiont Landslide in Italy [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5 (2): 77 ~ 84.
- [4] 中村浩之, 王恭先. 论水库滑坡 [J]. 水土保持通报, 1990, 10 (1): 53 ~ 64.
NAKAMURA H, WANG Gong-xian. On reservoir landslide [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10 (1): 53 ~ 64.
- [5] 刘少峰, 张国伟, Heller P L. 循化—贵德地区新生代盆地发育及其对高原增生的指示 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37 (S1): 235 ~ 248.
LIU Shao-feng, ZHANG Guo-wei, Heller P L. Cenozoic basin development and its indication of plateau growth in the Xunhua-Guide district [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2007, 37 (S1): 235 ~ 248.
- [6] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价 [J]. 地质力学学报, 2003, 9 (2): 143 ~ 153.
ZHANG Chun-shan, ZHANG Ye-cheng, MA Yin-sheng. The risk assessment for regional hazards collapses, landslide, debris flows in the Upper Yellow River [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9 (2): 143 ~ 153.
- [7] 吕宝仓, 任永胜, 朱慧俭, 等. 青海省循化县地质灾害详细调查报告 [R]. 西宁: 青海省地质环境监测总站, 2008.
LÜ Bao-cang, REN Yong-sheng, ZHU Hui-jian, et al. Geological disaster survey report in Xunhua County, Qinghai Province [R]. Xining: Qinghai Geological Environment Monitoring Station, 2008.
- [8] 陈玉华, 张敏, 张晓青, 等. 1990 年共和 7.0 级地震的发震构造讨论 [J]. 西北地震学报, 1998, 20 (3): 39 ~ 43.
CHEN Yu-hua, ZHANG Min, ZHANG Xiao-qing, et al. A discussion on seismogenic fault for the Gonghe M_s 7.0 earthquake in 1990 [J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20 (3): 39 ~ 43.
- [9] 路海宁. 共和 7.0 级地震前地下水氡变化的剖析 [J]. 高原地震, 1995, 7 (3): 70 ~ 72.
LU Hai-ning. Analysis of Radon in groundwater anomaly before Gonghe M_s 7.0 earthquake [J]. Earthquake Research in Plateau, 1995, 7 (3): 70 ~ 72.
- [10] 吴庆龙, 张培震. 黄河上游积石峡古地震堰塞湖溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39 (8): 1148 ~ 1159.
WU Qing-long, ZHANG Pei-zhen. A palaeo-earthquake induced damming and bursting of the Yellow River and the abnormal flood that destroyed Lajia Relics [J]. Science in China Series D: Earth Science, 2009, 39 (8): 1148 ~ 1159.
- [11] 石玲, 王涛, 辛鹏. 陕西省宝鸡市地质灾害发育特征 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (4): 351 ~ 363.
SHI Ling, WANG Tao, XIN Peng. Development characteristics of the geohazards in Baoji City, Shaanxi Province [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (4): 351 ~ 363.
- [12] 岳高伟, 李稳哲, 王辉, 等. 汶川地震中唐家山滑坡稳定性研究 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (2): 188 ~ 197.
YUE Gao-wei, LI Wen-zhe, WANG Hui, et al. Stability research of Tangjiashan landslide in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (2): 188 ~ 197.
- [13] 刘世雄, 冯君, 刘东. 第三系红层滑坡机理物理模型研究 [J]. 路基工程, 2009, (6): 174 ~ 176.
LIU Shi-xiong, FENG Jun, LIU Dong. Physical model of Tertiary System red bed landslide [J]. Subgrade Engineering, 2009, (6): 174 ~ 176.
- [14] 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 舟曲泄流坡滑坡变形特征及其形成机理 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (2): 178 ~ 187.
HUANG Xiao, YANG Wei-min, ZHANG Chun-shan, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of

- Xieliupo landslide in Zhouqu [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19 (2): 178 ~ 187.
- [15] 朱志铭, 周凯睿, 谭春洪, 等. 强降雨作用下边(滑)坡稳定性分析及预警技术研究 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19 (4): 423 ~ 430.
- ZHU Zhi-ming, ZHOU Kai-rui, TAN Chun-hong, et al. Study on technology of slope/landslide stability ananlysis and early warning under heavy rainfall [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19 (4): 423 ~ 430.
- [16] 陈芳. 循化县 40 年来气候资源的变化 [J]. *青海气象*, 2002, (2): 12 ~ 18.
- CHEN Fang. Changes in climate resources in Xunhua for 40 years [J]. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2002, (2): 12 ~ 18.
- [17] 王良艳, 王震. 持续降雨对滑坡的稳定性影响及治理措施研究 [J]. *工程建设与设计*, 2012, (5): 151 ~ 153.
- WANG Liang-yan, WANG Zhen. Reseach on landslide stability and treatment in persistent rainfall [J]. *Engineering Design of the Ground*, 2012, (5): 151 ~ 153.
- [18] 田洪宁, 牛彦博, 罗刚. 滑坡稳定性分析中 Geo-studio 软件的应用 [J]. *科技创新导报*, 2012, 16: 32 ~ 33.
- TIAN Hong-ning, NIU Yan-bo, LUO Gang. The Geo-studio software applications in stability analysis of landslide [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012, 16: 32 ~ 33.
- [19] 王力, 王世梅, 杨贝贝. 库水位变动条件下土-水特征曲线对滑坡稳定性计算结果的影响研究 [J]. *三峡大学学报: 自然版*, 2012, (3): 10 ~ 14.
- WANG Li, WANG Shi-mei, YANG Bei-bei. Research of SWCC on stability calculation of landslide under reservoir water fluctuation [J]. *Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences*, 2012, (3): 10 ~ 14.
- [20] 王学潮, 郭启良, 张辉, 等. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量 [J]. *地质力学学报*, 2000, 6 (2): 64 ~ 70.
- WANG Xue-chao, GUO Qi-liang, ZHANG Hui, et al. Crustal stress measurement in northeastern Qingzang Plateau by hydrofracturing [J]. *Journal of Geomechanics*, 2000, 6 (2): 64 ~ 70.

THE FORMATION CONDITIONS AND STABILITY OF CHAHANDUSI RESERVOIR LANDSLIDE IN XUNHUA COUNTY, QINGHAI PROVINCE

ZHANG Miao^{1,2}, ZHANG Chun-shan¹, YANG Wei-min¹, WANG Qiu-mei²,
LIU Xuan², LIU Ting²

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)*

Abstract: Based on the field work and engineering geologic investigation of Chanhandsi Reservoir Landslide in Xunhua County, this paper focuses on the development characteristics, formation conditions and stability analysis of this landslide. The result shows that this landslide is mainly influenced by landforms, stratum lithology, earthquake and hydrology. ANSYS is used for the stability analysis, which suggests that Chahandusi Reservoir Landslide is currently under stable state. It is necessary for landslide monitoring.

Key words: Chanhandsi reservoir landslide; formation conditions; stability analysis