

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.005

龙羊峡近坝库岸滑坡群稳定性分析及预警技术研究

李 季^{1,2} 苏怀智¹ 胡 江¹

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.黄河上游水电开发有限责任公司,青海 西宁 810008)

摘要:通过对龙羊峡水库蓄水前后边坡地质环境的长期监测,将库岸变形破坏分为完整地层岸坡和滑坡堆积体岸坡的破坏形式,对高库水位条件下的库岸稳定性进行了计算.在计算分析的基础上,对汛限水位抬高至 2594 m 后岸坡的可能的失稳方式、下滑量和潜在失稳边坡涌浪高度进行了评价.结果表明,在 2594 m 库水位时,可能失稳的为龙西边坡;在 2600 m 库水位时,可能失稳的为龙西和农场边坡,可以龙西和农场边坡 300 万 m^3 下滑量作为坝库岸滑坡涌浪高度的评价标准,在此期间确定汛期运行水位时可预留 3~4 m 的涌浪高度.

关键词:龙羊峡大坝;库岸稳定;防范措施;预警判据

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)05-0599-06

水库近坝库岸稳定是大坝建设和运行过程中的一个重大工程地质问题.国内外已建和拟建的水电站绝大多数都存在库岸边坡稳定性问题,如我国的长江三峡水利工程、黄河小浪底水利枢纽工程、雅砻江二滩水电站工程、金沙江溪落渡水电站工程,英国的 Bighorn 水库,加拿大的 Revelstook 工程,法国的 Verney 水库等^[1-6].据调查,黄河上游刘家峡—龙羊峡段,分布着许多类似于龙羊峡查纳滑坡的特大性高速滑坡,如龙羊峡库区滑坡群,李家峡水库 I、II 号滑坡及公伯峡的古什群滑坡群等.这些滑坡体的下滑量都在 100 万 m^3 以上,一旦失稳,将对电站的运行和下游人民生命财产安全造成巨大损失.

龙羊峡水电站为黄河上游第 1 座梯级电站,也是最大的高原水库.水库正常高水位 2600 m,相应库容 247 亿 m^3 .自 1986 年下闸蓄水以来,水库曾达到的高水位为:1989 年 11 月的 2575.04 m,1993 年 11 月的 2577.59 m,1999 年 11 月的 2580.89 m,2006 年 11 月达到最高水位,库水位由原河水位 2464.73 m 上升到 2597.62 m,升幅 132.89 m.

龙羊峡水库坝前右岸(南岸)11.5~15.8 km 的地段,由第四系中、下更新世河相地层组成,相对坡高达 300~500 m,坡度 35°~45°.在黄河高漫滩侵蚀期以来,该地段曾发生了一系列大型滑坡,滑坡堆积物岸坡占库岸长度的 80%.这些滑坡的共同特点是规模大($10^6 \sim 10^8 \text{m}^3$)、滑速高(20~45 m/s)、滑程远(1.5~3 km).如距坝 6.5 km 的查纳滑坡发生于 1943 年农历正月初三,下滑量达 1.6 亿 m^3 ,滑体前缘向前推进约 3 km,埋没了河边林带及坡下的查纳村,使黄河断流,估算最大滑速 45 m/s.通过地质测绘与分析,认为可能失稳的完整地层边坡有 6 处,自峡口至上游分别为:峡口、农场、龙西、查东、查纳及查西陡边坡^[7].在外界触发因素的影响下,该滑坡群有可能产生剧冲性滑动冲入水库,使水库产生巨大涌浪,给大坝的安全带来重大的不利影响.因此,水库蓄水后该滑坡群的稳定性问题是电站发电运行中的一大隐患,也是电站能否在高水头下运行亟待研究和解决的问题之一.

鉴于高速滑坡的实际存在,参考我国柘溪水库塘岩光滑坡和意大利瓦依昂水库滑坡形成涌浪灾害的经验教训,1977 年以来,对龙羊峡近坝库岸滑坡群稳定性进行了大量的勘察、试验、监测、计算和研究,同时进行了库岸安全监测设计和监测项目的施工^[7-9].蓄水前的研究已对龙羊峡近坝库岸高速滑坡的发生机制进行了分析,对岸边可能失稳块体的下滑量、滑速进行了预测,依据涌浪模型试验资料初定了坝前、生活区的涌浪高度.为了确保电站的安全运行,当时采取的防范原则是“不允许涌浪越过坝顶及两岸坝肩”,要求水库运行

收稿日期:2008-05-18

基金项目:国家自然科学基金(50539110,50539010,50579010),国家科技支撑计划(2006BAC14B03),水利部“948”项目(CT200612),国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2002CB412707)

作者简介:李季(1963—),男,辽宁法库人,高级工程师,主要从事大坝安全监控理论与防汛管理研究.

初期在坝顶高程之下预留滑坡涌浪高度 20~30 m,即限制的初期运行水位为 2570~2580 m.通过对原型观测资料的分析和水库蓄水后库岸变形转异机制的研究,认为各重点部位涌浪规模已较蓄水前预测的要小,规定预留涌浪高度已逐渐减少到 13 m.

2006 年 11 月的最高水位(2597.62 m),接近正常蓄水位 2600 m,若再加上自然环境场的变异,龙羊峡近坝库岸滑坡群是否会整体失稳产生剧滑(水库涌浪)失稳后会不会给大坝安全造成影响,电站能否在正常蓄水位下运行,直接关系到龙羊峡电站的安全和经济效益的充分发挥.为此,本文对高库水位条件下的近坝库岸滑坡体稳定性进行了计算分析,对汛限水位抬高至 2594 m 后岸坡可能的失稳方式、下滑量和潜在失稳边坡涌浪高度进行了评价,并且提出了建议防范措施和预警判据,从而为电站的安全、经济运行以及是否需对该滑坡群进行进一步处理提供可靠的决策依据.

1 近坝库岸变形破坏机制

根据对龙羊峡近坝库岸的前期研究和蓄水以来的库岸变形破坏地质调查及其转异特征研究,库岸变形破坏可分为完整地层岸坡变形破坏和滑坡堆积体岸坡变形破坏 2 大类.

1.1 完整地层岸坡变形破坏

完整地层岸坡系指由完整湖相地层组成的高陡边坡,其变形破坏机制有 2 种形式:一是高速滑坡形式,其特征是规模大、滑速高,是滑坡涌浪研究的主要对象,最具代表性的是发生于 1943 年农历正月初三的查纳滑坡;二是坍塌形式,主要表现在蓄水以来的高度岸坡坍塌破坏,典型部位有峡口、龙西、查东等完整高度岸坡.

a. 龙羊峡水电站近坝库岸南岸高速滑坡群的形成,是该地区特定的地质环境决定的.既有高陡的岸坡,易滑的地层,半成岩状呈脆性破坏的土体,又有控制滑面形态的软弱结构面和适合酝酿成大规模滑动的水文地质条件.

b. 在龙羊峡地区,高速滑坡只产生于完整湖相地层组成的岸坡的第 1 次滑动.斜坡失稳前经历长期的变形过程,黏性土累进性破坏是失稳的主要原因.高速滑坡滑面由 3 段组成,其中段为锁固段,锁固段在剪断时呈脆性破坏,土体峰—残强度差值大,滑体在瞬间获得较大的动能是发生高速滑动的主要原因.

1.2 滑坡堆积体岸坡变形破坏

滑坡堆积体岸坡系指由老滑坡堆积物组成的岸坡,在低库水位时约占近坝岸坡地段的 80%.随着库水位的升高,老滑坡堆积体岸坡逐渐减少.在目前高库水位条件下,堆积体岸坡分布在龙羊滑坡、查纳滑坡前缘及查西陡边坡中部等.

滑坡堆积体岸坡的变形破坏以崩塌、错落为主和小型滑坡等形式为主.变形破坏过程中具有明显的分解趋势,其规模小、滑速低,不会对工程造成涌浪危害.

2 近坝库岸稳定计算分析

2.1 稳定计算方法与基本模式

对峡口、农场、龙西、查东、查纳及查西 6 处高陡边坡,选取代表性剖面,根据地质勘察和试验确定的边界条件及物理力学参数,采用多种极限平衡法和平面有限元分析,对不同水位条件下库岸的稳定性进行计算.稳定计算的基本模式见图 1.

在农场、龙西、查东各边坡的监测洞内或地表已见表张拉裂缝,在块体平衡及有限元计算中,AB 段抗剪强度已不计 c 值.查纳、查西、峡口边坡 AB 段仍计 c 值,各计算剖面 CD 段均选用易滑层面抗剪参数.稳定计算均未考虑地震力在库岸变形地过程中的作用.

2.2 极限平衡法稳定计算成果分析

库水位分别为 2580.89 m、2594 m 和 2600 m 时,分别采用萨尔玛法、毕肖普法和块体极限平衡法进行稳定性计算,其最小安全系数见表 1.为了对库水位 2594 m 时近坝库岸的稳定性进行重点论证,分别采用剩余推力法、滑楔法、摩根斯坦—普莱斯法和斯宾森法进行补充计算,其最小安全系数见表 2.根据 DL/T5353—2006《水电水利工程边坡设计规范》^[10]中确定的安全系数,以安全系数 K 值判断边坡的稳定性: $K < 1.05$ 为稳定性较差的边坡; $K = 1.05 \sim 1.10$ 为基本稳定边坡; $K > 1.10$ 为稳定边坡^[11].通过比较多种方法的计算结果得到如下结论:

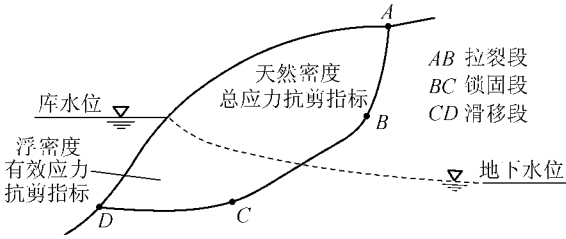


图 1 稳定计算模式

Fig.1 Sketch of the model for stability calculation

表 1 不同库水位近坝库岸计算最小安全系数

		最小安全系数								
边坡	土方量/ 万 m ³	库水位 2 580.89 m			库水位 2 594 m			库水位 2 600 m		
		萨尔玛法	毕肖普法	块体极限 平衡法	萨尔玛法	毕肖普法	块体极限 平衡法	萨尔玛法	毕肖普法	块体极限 平衡法
峡口		1.42	1.36	1.42	1.33	1.23	1.30	1.23	1.13	1.23
农场	300	1.29	1.30	1.29	1.16	1.27	1.16	1.06	1.12	1.06
龙西	250 ~ 300	1.08	1.16	1.08	0.98	1.13	0.98	0.97	1.08	0.96
查东	300	1.31	1.27	1.31	1.15	1.22	1.15	1.17	1.22	1.17
查纳	6 900	1.23	1.24	1.22	1.08	1.16	1.08	1.07	1.15	1.06
查西	9 500	1.48	1.66	1.47	1.35	1.50	1.35	1.30	1.42	1.30

a. 在库水位 2 580.89 m 时近坝库岸陡边坡均是稳定和基本稳定的,其中龙西边坡稳定安全系数较低,这和目前库岸的整体稳定状态是一致的.

b. 在库水位 2 594 m 时,龙西陡边坡的安全系数较低,部分计算的 K 值小于 1,有发生 250 万 ~ 300 万 m³ 滑坡的可能性,计算结果与目前龙西陡边坡的变形趋势基本一致.查纳边坡的安全系数偏低,考虑到现查纳边坡呈内凹拱型,边坡整体的稳定性安全系数应该大于计算的安全系数,因此认为在预测期内查纳边坡不会失稳,其余边坡是稳定的.

表 2 2 594 m 库水位近坝库岸极限平衡法计算最小安全系数

Table 2 Minimum safety factor of landslides near Longyangxia Dam for limit equilibrium method when reservoir water level is 2 594 m					
边坡	土方量/ 万 m ³	最小安全系数			
		剩余 推力法	滑楔法	摩根斯坦- 普莱斯法	斯宾 森法
农场	300	1.43	1.42	1.67	1.66
龙西	250 ~ 300	1.12	1.13	1.29	1.29
查纳	6 900	1.40	1.34	1.71	1.79
查西	9 500	1.49	1.43	1.70	1.86

c. 在库水位 2 600 m 时,龙西、农场陡边坡的安全系数均较低,部分计算的 K 值小于 1,预计有发生 250 万 ~ 300 万 m³ 滑坡的可能性;查东边坡有可能发生小规模的塌滑破坏;查纳边坡的安全系数偏低,根据查纳边坡目前的地形地质条件判断,边坡整体的稳定性较高,边坡处于整体稳定状态.

2.3 有限元法稳定计算成果分析

对库水位 2 594 m 进行了线弹性模型有限元计算,以边坡沿滑弧向下方向的应力为依据,求得各滑动面的点安全度,利用点安全度得到各滑面总体稳定安全系数.从计算结果可知:

- a. 各计算剖面最大、最小主应力都随着边坡竖向深度的增加而增大.大主应力方向在岸内深处近于垂直,向坡外渐与坡面平行.
- b. 在高库水位条件下,坡体下部坍塌变陡,岸坡应力发生重分布,各边坡坡脚处出现了不同程度的剪应力破坏区,其中以龙西、农场边坡较为明显,这与龙西、农场边坡蓄水后坡形改变较大有关,而查纳、查西边坡坡形改变较小.
- c. 农场边坡和查纳边坡的坡角处出现较大的剪应力集中现象,说明农场、查纳边坡具有孕育较大规模滑坡的可能性.龙西边坡在高水位附近出现应力集中现象,说明具有发生小规模滑坡的可能性.
- d. 各边坡稳定的安全程度是不同的.龙西稳定性较差,农场次之.在 2 594 m 水位时,各边坡的稳定安全系数大于 1.1,为稳定边坡;在 2 600 m 水位时,龙西的稳定安全系数为 1.04 ~ 1.10,说明具有发生 250 万 ~ 300 万 m³ 滑坡的可能性.其余边坡稳定性较好.

综上所述,平面有限元计算和块体极限平衡法计算所反映的边坡稳定性成果是基本一致的,可作为稳定性评价的基本依据.

3 潜在失稳边坡研究及涌浪高度评价

3.1 潜在失稳边坡特征

龙羊峡水库在高水位运行期,在距大坝 1.5 km 以远,水面宽度由 1 ~ 2 km 迅速扩大到 5 ~ 7 km.库岸滑坡需同时满足距坝近、规模大、滑速高 3 个条件,滑坡激起的涌浪才可能对大坝和北岸生活区的安全构成威胁.

通过对库岸基本地质环境和高速滑坡形成机制的研究,认为潜在可能失稳边坡主要有农场、龙西、查东、查纳及查西陡边坡,其边坡特征见表3。

表3 近坝库岸高速滑动部位不稳定边坡特征

Table 3 Characteristics of unstable slope near Longyangxia Dam

位置	距大坝 距离/km	地形特征		地貌特征	地层结构	预测最大下滑 量/万 m ³	预测 主滑方向
		坡高/m	坡度				
峡口	2.4	227 ~ 270	下部 80°, 上部 30° ~ 45°	北高南低,三面环水,坡脚处有高滩 I 级阶地分布,岸坡平直	由Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ 4 层构成,有平行岸坡的裂隙分布,数量较少	300 ~ 500	向上游 NW290°
农场	2.8	280 ~ 295	下部 30° ~ 45°, 上部局部 80°	夹于 3 号、4 号沟之间,三面环水,坡脚处有高漫滩分布,岸坡略有内凹	由Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ 3 层组成,裂隙发育,中、下都有 3 个滑坡分布	1 000 ~ 2 000	向龙羊峡口 NE9°
龙西	3.8	275 ~ 290	40° ~ 45°	位于磨坊与龙羊滑坡间孤立山脊,岸坡向外突出,坡后有冲沟切割	由Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ 3 层组成,裂隙发育,坡脚下有龙西新滑坡分布	1 000 ~ 2 000	向黄河 NE16°
查东	5.2	300 ~ 330	下部 15° ~ 25°, 上部 40° ~ 45°	位于查纳滑坡东侧,呈一突出之山脊,三面环水,表面地形破碎	由Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ 4 层组成,下部有查纳河阶地,风积砂及小滑坡分布	1 000 ~ 2 500	指向黄河下游 NE45°
查纳	6.0	420	下部 15° ~ 45°, 上部 40° ~ 50°	查纳滑坡后的破裂壁,现呈凹表坡,坡顶平台宽阔,两侧有冲沟切割	由Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ,Ⅶ 5 层组成,2 600 m 高程以下有滑坡堆积物分布,2 510 m 处为一平坦的滑坡湖	4 000 ~ 7 000	向黄河 NE18°
查西	8.5	440	下部 30° ~ 35°, 上部 40°	岸坡平直,块体较大,坡脚濒临黄河,2 550 m 高程有一宽阔平台	由Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ 4 层组成,表层有崩坡积物覆盖,2 600 m 以下为查西滑坡	5 000 ~ 9 500	向黄河 SN

3.2 潜在失稳边坡涌浪高度预测

水库蓄水后库岸环境会有明显改变,预计滑坡的发生一方面将追踪自然岸坡发生的模式,另一方面库水的渗透、浸泡作用将迅速改变原有岸坡的平衡状态。小型滑坡、崩塌可能会先较大规模滑坡形成,坡体分解、分块依次下滑的可能性较大。为对各边坡失稳涌浪危害进行评价,进行滑坡涌浪模型试验^[11],模型比例尺为 1:500,在各种可能失稳的位置,用不同体积的滑体(小块体)在各滑速和库水位条件下,模拟库水产生的涌浪高度。预测的各潜在滑坡的危害程度及稳定状况见表4。

表4 各稳定性差的滑体预测涌浪成果

Table 4 Forecasting results of surge caused by potential landslides

边坡名称	与大坝的 距离/km	下滑量/ 万 m ³	滑速/ (m·s ⁻¹)	坝前库 水位/m	涌浪 高/m	涌浪 高程/m	生活区爬浪 高程/m
龙西	3.8	250 ~ 300	25	2 594	3	2 597	2 603
				2 600	< 3	< 2 603	2 606
		900	25	2 594	10	2 604	2 624
				2 600	8	2 608	2 624
农场	2.8	300	16	2 594	4	< 2 597	2 601
				2 600	3	< 2 603	2 607
		650	16	2 594	5	2 599	2 605
				2 600	< 3	< 2 603	2 607
查东	5.2	190	23				
		300	23	2 594 ~ 2 600	< 3		< 2 606
		500	23				

3.3 涌浪高度分析评价

- a. 在 2 594 m 库水位时,可能失稳的为龙西边坡,沿龙西最危险滑弧下滑量为 250 万 ~ 300 万 m³,在相应库水位时的坝前涌浪高度为 3 m,在北岸生活区 1 号水尺处爬高为 2 603 m。
- b. 在 2 600 m 库水位时,可能失稳的为龙西和农场边坡,沿龙西最危险滑弧下滑量为 250 万 ~ 300 万 m³,沿农场最危险滑弧下滑的土方量为 300 万 m³,在相应库水位时坝前涌浪高度分别为 3 m 和 3 ~ 4 m,在北岸生活区 1 号水尺处爬高为 2 606 ~ 2 607 m。
- c. 根据多年来农场、龙西、峡口、查东等边坡实际观测到的破坏机制分析,龙西、农场上部观测隧洞中张拉裂缝分布较多,预计上述各边坡仍有可能继续分块解体呈小方量坍塌,直至形成稳定边坡,这样不会造成涌浪危害。以这种方式破坏可能性最大的为峡口和查东边坡。

综上所述,坝库岸滑坡涌浪高度的评价标准,可以龙西和农场边坡下滑量为 300 万 m³ 来制定龙峡近坝库岸滑坡涌浪高度的评价标准。在此期间确定汛期运行水位时可预留 3 ~ 4 m 的涌浪高度。随着库岸变形实际监测资料的不断积累,应根据库岸再造和监测资料对其变形破坏形式进行调整。

4 防范措施

近坝库岸的防范措施主要是加强库岸监测,进行滑坡预警等级和预警判据研究。

4.1 滑坡监测

近坝库岸高边坡滑动失稳最可靠的前兆迹象是地面和地下土体出现开裂和倾斜,评价库岸的整体稳定性则主要取决于蓄水后地下水抬升新增饱和土体的扩张范围。监测手段为大地测量、洞内水准测量、洞内变位观测、地下水位观测及地质巡视监测等。监测范围自坝前至查西陡边坡长约 9 km 的岸坡,重点监测对坝前及北岸生活区涌浪影响较大的农场、龙西、查东陡边坡。

4.2 滑坡预警

基于龙羊峡库岸稳定监测,对滑坡预警及下滑判据进行探索性研究,目的是在确保大坝电厂和北岸准许居民区安全的前提下,建立一个可供上级主管部门决策的参考程序和依据。

4.2.1 预警范围和预警等级

a. 预警范围。(a)监测范围内(即自坝前到查西边坡长约 8.5 km)大坝及北岸高岸高程 2 606.5 m(移民迁移线)以上准许居民区的安全。(b)对一次下滑量大于 250 万~300 万 m^3 的滑坡,即可能对大坝和北岸生活区造成涌浪危害的滑坡,进行滑前预报分析。经常性发生的、分布于库水边线的小规模崩塌和滑速缓慢的二次滑坡,不进行预警。

b. 预警等级。按滑坡所处的变形发展阶段和预测下滑时间,分为 4 级。(a)Ⅲ级警报。当地面(或观测洞内)出现后缘拉裂缝时,预测下滑时间为 1 a 以后,相当于长期预报。(b)Ⅱ级警报。当滑坡进入到加速蠕变阶段初期,预测下滑时间为 0.5~1 a。(c)Ⅰ级警报。当滑坡进入到加速蠕变阶段中至后期,预测下滑时间为三四个月。Ⅱ级、Ⅰ级警报相当于中期预报。(d)临滑预报。当滑坡进入到加速蠕变阶段后期,同时又出现了多种下滑前兆迹象时,预测下滑时间为 1~7 d。

4.2.2 预警判据

滑坡预警判据是一个非常复杂的问题,它需要多因素控制,而不是单一判据可以预警的。滑坡预警判据拟分为指示性判据和参考判据 2 类。

4.2.2.1 指示性判据

a. 拉张裂缝。拉张裂缝是岸坡变形破坏最显著的宏观指示性判据。拉张裂缝的宽度、深度及变化速率达到一定量值,是许多坡体失稳的重要判据,但因地质环境差异、滑坡失稳规模及机理的不同,也有较大差别。

半岩性土组成的高速滑坡仅有龙羊峡库区龙西新滑坡和甘肃洒勒山滑坡 2 个实例,其共同点是加速蠕变阶段的历时较长(0.5~2.0 a),加速蠕变阶段位移速率较低(0.25~2.1 mm/d),这个特征反映了坡体呈渐进性和脆性破坏的特点。沿软弱结构面和第四系松散堆积层产生的滑坡,加速蠕变阶段历时均很短(8~60 d),位移速率也较大(>10 mm/d),反映了塑性剪破坏特点。

洒勒山高速滑坡在临滑前几天后缘拉裂缝还有趋于闭合、错台增大的现象,这是下滑前坡体转动的结果,预示着坡体即将失稳。拉裂缝变化数据可通过地表和观测洞内的变位、裂缝相对位移监测取得。

b. 监测点位移测量。建立典型观测点的时间-位移曲线,对潜在滑体的剧滑时间作出预报。目前比较常用的有 2 种方法,即“外延法”和“斋藤法”。但利用这些方法进行下滑时间预报时,只有当变形进入到加速蠕变阶段后期方能取得比较好的效果,比较适用于临滑预测。在下滑前 1~7 d 的预报精度可以达到 1 d 以内。

综上所述,滑体后缘拉裂缝的开裂宽度和速率、监测点总位移速率,是指示性判据中最重要的内容。

4.2.2.2 参考性判据

a. 地面和钻孔倾斜测量。地面倾斜测量仅能反映坡体的倾斜变化,本身并不能建立与滑坡预报相关的预测模型,所以只能作为参考性判据。

b. 地下水位测量。这是参考性判据中比较重要的一种。可以根据地下水位测量结果和岸坡稳定性计算成果分析坡体的稳定性。如出现升、降的异常变化,也可能是原有的渗透途径和地层透水性因坡体位移而发生变化。当出现测量探头受阻或观测孔因滑面附近剪切位移被错断情况时,还可提供可能的滑面位置。

c. 其他前兆迹象。(a)边坡掉块。查纳滑坡在下滑前 2~3 个月即开始出现掉块现象,位置多在坡顶的陡坡上,历时较长,方量也较大。甘肃洒勒山滑坡则在下滑前半小时左右,才发现斜坡中、上部土体有小量塌方现象。(b)地声和微震。国内外滑坡实例表明,滑坡下滑前有岩(土)体间局部错动引起的微震,振幅不规则。

必须指出,滑坡预警的难度很大,不可机械地使用上述判据作出决断,其可靠程度取决于对潜在滑体出现的种种变形迹象的综合分析和判断,因此在各预警等级发布前须组织专家进行会商。

5 结 语

本文根据高速滑坡机制、库岸形态变化规律、地下水位动态规律的研究成果,对龙羊峡水库 2 594 m 和 2 600 m 库水位时的库岸稳定性作了评价,对可能失稳滑块在坝前的涌浪高度和北岸生活区的爬浪高程进行了预测。在不考虑地震力对库岸变形作用前提下的主要预测结果是:在 2 594 m 库水位时,可能失稳的为龙西边坡,此水位时的坝前涌浪高度为 3 m;在 2 600 m 库水位时,可能失稳的为龙西和农场边坡,此水位时的坝前涌浪高度分别为 3 m 和 3~4 m;以龙西和农场边坡 300 万 m^3 下滑量作为近坝库岸滑坡涌浪高度的评价标准,在此期间确定汛期运行水位时可预留 3~4 m 的涌浪高度。

近坝库岸的防范措施主要是加强库岸监测,进行滑坡预警等级和预警判据研究。滑坡下滑前,边坡上出现的各种变形迹象是滑坡监测的对象,也是滑坡预警的判据。其中后缘拉裂缝的开裂过程和位于坡顶位移监测点的变化过程是滑坡预报的主要依据,是预警的指示性判据。

鉴于库岸稳定性预测是一个十分复杂的课题,本文结论是多年的研究成果的积累,仍须检验。在高库水位运行期间,建议继续加强近坝库岸的安全监测,对监测重点部位的监测手段、监测项目、监测设备、监测周期的设定等进行必要的改进和完善,严密监视库岸的变形动态,深入分析各项原型监测资料,做好滑坡预报工作,在确保安全的前提下,充分发挥龙羊峡水电站的经济效益。

参考文献:

- [1] 李振富,黄应胤,沈怀至.龙西滑坡三维有限元分析研究[J].水利水电技术,2004,35(8):25-27.
- [2] 曹洪,房营光.深圳水库高边坡的稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):906-910.
- [3] 潘家铮.建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M].北京:水利出版社,1981.
- [4] 高德军,徐卫亚,郭其达.长江三峡大石板滑坡计算参数反分析[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):74-78.
- [5] 高明忠,谢和平,周宏伟.水库蓄水前后库岸稳定性研究方法概述[J].水利水电科技进展,2004,24(7):93-96.
- [6] 胡铁松,蔡德所,何薪基.清江隔河岩库区滑坡预测的神经网络方法[J].水利水电科技进展,1998,18(1):38-40.
- [7] 李天扶,王志硕.黄河龙羊峡水电站工程地质勘察概述[J].工程勘察,2006(3):37-44.
- [8] 庆祖荫.龙羊峡水电站近坝库岸稳定及滑坡涌浪评价[G]//黄河龙羊峡水电站勘测设计重点技术问题总结(第一卷).北京:中国电力出版社,1998.
- [9] 余仁福.黄河龙羊峡工程近坝库岸滑坡涌浪及滑坡预警研究[J].水力发电,1999(3):14-16.
- [10] DL/T 5353—2006 水电水利工程边坡设计规范[S].
- [11] 龙羊峡水电站库岸稳定分析报告[R].西安:中国水电顾问集团西北勘测设计研究院,2006.

Stability analysis and early-warning technology of landslides near Longyangxia Dam

LI Ji^{1,2}, SU Huai-zhi¹, HU Jiang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Upper Yellow River Hydropower Development Company Ltd., Xining 810008, China)

Abstract: Through long-time monitoring of the geological environment of slopes before and after the impounding of the Longyangxia Reservoir, the deformation failure modes of the reservoir bank can be classified as either a failure composed of complete stratum or a failure composed of landslide accumulation. The stability of the reservoir bank under high water level conditions is calculated and analyzed. When the limited water level in flood season is 2 594 m, the possible glide manner after losing stability of landslide is analyzed, and the glide quantity and surge height caused by potential landslides are predicted. The results show that the Longxi slope may be unstable when the reservoir water level is 2 594 m, and both the Longxi and Nongchang slopes may lose their stabilities when the reservoir water level is 2 600 m. It is also indicated that 3 000 000 m^3 -glide quantity of Longxi and Nongchang slopes can be used as evaluation criterion of surge height, and that when determining operating water level during flood season, the surge height of 3-4 m can be preserved.

Key words: Longyangxia Dam; stability of reservoir bank; prevention measure; early-warning criteria