

# 小浪底水利枢纽库坝区主要环境工程地质问题分析

张 勤<sup>1</sup>, 朱代洪<sup>2</sup>, 苟联盟<sup>1</sup>, 李 磊<sup>1</sup>

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南昌水利水电高等专科学校, 江西 南昌 330029)

**摘要:** 根据现场资料, 对小浪底水利枢纽库坝区主要环境工程地质问题发育的地质环境、形成机理、变形破坏特征、可能造成的灾害程度等进行分析。结果表明, 随着库水位的逐渐升高, 水库蓄水引起的近坝库岸稳定、库坝区渗漏、水库诱发地震及水库淤积等环境工程地质问题已开始孕育和发展, 有的问题已经出现。

**关键词:** 环境地质; 工程地质; 库岸稳定; 渗漏; 水库诱发地震; 小浪底水利枢纽

**中图分类号:** X141

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2001)06-0033-03

小浪底水库已于1999年10月25日下闸蓄水, 首台机组已于2000年1月9日并网发电。目前库水位已超过230m, 蓄水量达70多亿 $m^3$ 。随着水库运行的开始, 有关水库环境工程地质问题已经开始孕育并呈发展趋势。对这些问题发育的地质环境、形成机理、发展趋势、灾害程度以及防灾对策的环境工程地质研究, 无疑将有利于保证水库的正常运行。

## 1 库坝区地质环境

小浪底水库区为中低山~低山丘陵区。构造单元属于华北断块南缘的豫皖断块。库坝区位于豫皖断块与鄂尔多斯断块、太行山断块接触部位, 受其控制, 区内地质构造发育, 地层组合复杂。出露地层主要为元古界的砂岩、安山岩, 下古生界的碳酸盐岩和上古生界及中生界的砂岩、粘土岩, 表层分布有第四纪地层。因此, 软硬相间的地层组合, 宽缓的褶皱构造、发育的陡倾角断裂和泥化夹层构成了库坝区基本地质格架<sup>[1]</sup>。

## 2 主要环境工程地质问题分析

### 2.1 近坝岸坡稳定问题

小浪底近坝库岸上自竹峪, 下至东苗家, 长约6km的岸段共发育滑坡、崩塌、倾倒变形体19处, 约占库区变形体总数的1/3, 体积由几万 $m^3$ 到上千万 $m^3$ 。除1号、2号和东苗家三处古滑坡在275m水位时没有被库水完全淹没外, 其它都位于正常水位以下, 因此近坝岸坡的稳定问题将直接影响或威胁水库的正常运行。

#### 2.1.1 1号滑坡

1号滑坡位于坝址上游右岸3.0~3.8km处, EW长约650m, SN宽约400m, 滑体分布高程在120~300m之间, 最大厚度80余m, 总体积1100万 $m^3$ 。滑体组成物质主要为刘家沟组( $T_1^2, T_1^3, T_1^4$ )紫红色砂岩夹薄层粘土岩及石千峰组( $P_2^4$ )上部的粘土岩, 上覆5~25m厚的马兰黄土。滑床形态与地层产状基本一致, 滑面倾角 $13^\circ \sim 20^\circ$ , 滑动方向NE $18^\circ$ 。滑坡边界主要受赤河滩东沟、1号沟、后缘 $F_{10}$ 断层及临河岸坡控制。根据有关研究资料, 1号滑坡在库水位分别为150m, 180m, 210m, 230m, 250m, 275m高程时, 用不同方法预测结果为: 不考虑地震时的边坡安全稳定系数为0.990~1.161; 7度地震时为0.922~1.074; 8度地震时为0.851~0.998。显然, 1号滑坡在蓄水过程中的稳定性是比较差的, 尤其是库水位高于180m以及在7~8度地震作用下, 其安全系数几乎均小于1。根据蓄水后滑坡体变形观测, 1999年11月份, 当库水位蓄至195m高程时, 滑坡体东侧山体240m平台以下产生明显位移, 并出现了多条平行岸坡分布的地裂缝。到12月中旬, 当库水位达205m时, 地裂缝向上发展到254m平台, 间距约5m, 最大宽度约5cm, 并有水汽从裂缝中逸出, 显然裂缝切割深度较大, 贯通性好。2000年4月底当库水位接近210m高程时, 裂缝间距发展到3~5m, 最大宽度15~20cm, 最大垂直位移达20cm, 表明1号滑坡随水位升高变形仍在持续。

#### 2.1.2 2号滑坡

2号滑坡体位于坝址上游右岸2.2~3.0km处,

作者简介: 张勤(1956—), 男, 陕西乾县人, 副教授, 博士研究生, 主要从事地质工程及环境地质研究。

与1号滑坡仅一沟(1号沟)之隔,EW长约750m,SN宽约300m,平均厚度25.8m,总体积为410万 $\text{m}^3$ .滑体分布高程为150~300m.滑坡边界主要受1号沟、6号沟及后缘 $F_{10}$ 、临河岸坡和发育在 $T_1^3$ 和 $T_1^4$ 岩组中的滑动面控制.有关定量分析表明:2号滑坡西侧(1号沟至2号沟之间山梁)在上述6种水位情况下,不考虑地震作用时,抗滑稳定系数为0.959~1.048;7度地震时为0.868~0.974;8度地震时为0.789~0.909.即无地震力作用时,边坡处于临界状态;在7~8度地震作用下,边坡处于不稳定状态.

1号和2号滑坡较近,所处地质环境相似,若同时产生整体滑动,其危害更大.即使分别整体滑动,不仅涌浪会危及旅游船只的安全,同时大规模的滑体物质堆积于坝前,对水库槽库容的形成和水库拉沙可能造成极为不利的影响.

### 2.1.3 东苗家滑坡

东苗家滑坡位于大坝下游右岸2km处,SN长约400m,EW宽约350m,平均厚度35m,总体积约500万 $\text{m}^3$ .两侧近SN向冲沟为其纵向切割边界, $F_1$ 断层为其后缘横向切割面,滑带位于 $T_1^4$ 岩组中,厚度20~70cm,分布高程为160~180m,产状为 $20^\circ \angle 6^\circ \sim 10^\circ$ .地表黄土覆盖层中发育有多条弧形裂缝,表明该滑坡具有多级分块滑移及变形持续时间较长的特征.地表水、地下水、地震以及人为因素作用是影响边坡稳定性的主要因素.根据有关典型剖面分析,当孔隙水压力系数分别为0.05,0.1,0.15,0.2时,不考虑地震作用,边坡安全系数为1.093;7度地震时为1.013;8度地震时为0.911.表明该边坡稳定性较差.一旦再次滑动,其主要危害是堵塞排沙、泄洪及发电建筑物出口;破坏横穿滑体的4号公路;危及后缘移民新村安全.故必须予以高度重视和加强安全监测.

## 2.2 水库及坝区渗漏问题

根据小浪底水库地层和地质构造发育特征,可能的渗漏通道主要为断裂破碎带、岩溶管道及裂隙透水岩体.库区内16%的库岸为下古生界寒武系、奥陶系可溶性石灰岩和白云岩,应查明岩溶发育程度和连通情况.受狂口背斜控制,坝基部位地层倾向下游,砂岩中裂隙发育,透水性强.库水位升高后,裂隙透水岩体接受库水补给,也可能形成坝基或绕坝渗漏.尤其要注意不同断裂构造的透水性,断层破碎带一般阻水性较好,但其影响带往往是透水性很强的集中渗漏通道.目前,水库刚刚蓄水,但坝址右岸1号排水洞的渗漏量已超过300多 $\text{m}^3/\text{h}$ ,是计算值的6~7倍,足以说明断裂带及透水岩体的渗漏问题

不容忽视.水库渗漏不仅造成水量损失,更重要的是渗流作用可能引起地基岩土体渗透变形、结构面强度降低及深部孔隙水压力增加等严重后果<sup>[2]</sup>,容易产生抗滑稳定及水库诱发地震等问题.

## 2.3 水库诱发地震问题

水库诱发地震环境工程地质问题发育的优势因素主要有地层岩性、地质构造、断层应力形式、水文地质条件、地应力及历史地震背景.水库地震的岩组优势是指水库诱发地震的发生空间和强度在不同类型地层中的分布具有统计上的选择性.从现有的诱震几率分布分析,三大岩中的沉积岩(尤其是碳酸盐岩类)具有明显的发震“高频优势”,而强震则以火成岩为最.构造岩岩组,由于特殊的渗流特性和发育深度,在发震几率和强度上也占有明显的优势.根据夏其发等人1981年的研究结果,在60座水库诱发地震震例中,发育在碳酸盐岩和其它沉积岩中的地震诱发震占统计总数的62.7%;震级大于5.0级的地震占统计总数的60%.对43座诱发地震的研究结果表明,以断层破碎带和岩溶裂隙带为渗透条件的发震几率分别为70%和30%.小浪底库区属典型的华北型地层,其古生界下部为一套海陆交互的粘土岩、碳酸盐岩建造,上部为陆相建造.在大断裂附近岩浆岩呈串珠状分布.从岩组条件分析,小浪底库区已经具备了发震优势.

小浪底库坝区位于我国华北断块南部次一级构造豫皖断块的西北隅.区域构造稳定性及库坝区地质构造主要受汾渭断陷带及太行山前断裂的控制.受其影响,构造运动主要表现为断块之间的间歇性差异性升降运动,库区及周边地区发育有一系列第四纪活动断裂(图1)和三门峡、垣曲、宜洛、济源等断陷盆地等.水库诱发地震大部分发生在这种活动性大地构造环境中,尤其是新生代断陷盆地的边缘.大量水库诱发地震震源机制研究表明,水库诱发地震的震源机制以正断型或走滑型应力模式为主.根据图1各断层构造分布的位置、规模、活动性及对工程可能的危害程度,笔者认为,小浪底近坝库段可能导致水库诱发地震的活动断层主要有城崖地断层、塔底断层、石井河断层及小南庄断层,各断层特征见表1.显然,小浪底库坝区从地质构造及断层应力形式上完全具备了产生水库诱发地震的可能.

从水库诱发地震震例分析易见,发生诱发地震的库区往往存在使库水向深处入渗的透水岩体或结构面,以及阻止入渗库水外渗的不透水体这样特定的水文地质条件.这样的人渗带愈宽,周围的封闭性愈好,则其入渗循环的深度就愈大,库水入渗带内孔

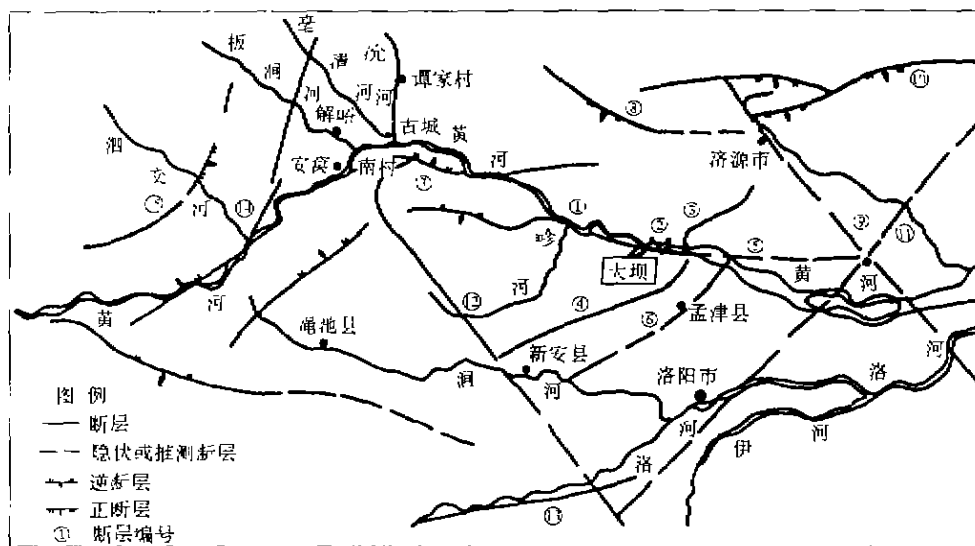


图1 小浪底水库及临近地区第四纪活动断层分布

①石井河断层;②小南庄断层;③连地断层;④王良断层;⑤坡头断层;⑥霍村断层;⑦塔底断层;⑧封门口断层;  
⑨五指岭断层;⑩盘古寺断层;⑪焦洛断层;⑫城崖地断层;⑬宜阳断层;⑭石家沟断层;⑮架噪断层

表1 小浪底水库主要活动性断层特征

| 断层名称  | 延伸长度<br>/km | 距坝址最小<br>距离/km | 产 状                  | 垂直断距<br>/m | 活 动 特 征                                                 |
|-------|-------------|----------------|----------------------|------------|---------------------------------------------------------|
| 城崖地断层 | >100        | 32             | 315°/NE_65°~75°      | 近1000      | 控制两盘第三系地层分布,具有左旋扭动特征,是本区深大断层之一,近期仍有微震记录。                |
| 塔底断层  | 48          | 18             | 近EW/N_70°            | >2000      | 断层两盘地层相差悬殊,见有Q <sub>2</sub> 地层被错断及泉水线状分布,为具有左旋扭动的正平移断层。 |
| 石井河断层 | 51          | 0              | 280°~300°/NE_80°~85° | 约200       | 构成了洛阳盆地北侧第三系的分布边界,在晚更新世早期仍有活动,断层泥热释光测龄为16.5万a。          |
| 小南庄断层 | 85          | 0              | 45°~55°/NW_80°~85°   | 约300       | 断层带早期岩脉被错断,据断层泥测定,中更新世后期仍有活动。                           |

隙水压力增加,有效应力减小,同时软化作用使岩体强度降低,有利于地下岩体的变形破坏及释放已积累的应变能。这表明以断裂破碎带及岩溶裂隙带为入渗条件者诱发地震的几率较高,小浪底库区同样具备了类似的水文地质条件。根据以上分析,小浪底水库具备诱发地震的优势因素,存在水库诱发地震的可能性,必须予以重视。

### 3 结论与建议

a. 水库蓄水后,库岸边坡所处的地质环境发生了变化,水库边岸再造是必然的。虽然大坝设计时已经考虑到涌浪漫坝的问题,但岸坡变形破坏对水库正常运行及旅游船只和有关移民点安全的威胁依然存在。建议加强对上述滑坡的变形监测,密切注意岸坡变形动态,掌握岸坡变形破坏规律,及时进行岸坡稳定性的环境工程地质预测预报,必要时对上述不稳定边坡的关键部位采取人工加固措施,把岸坡变形破坏可能产生的灾害降低到最低程度。

b. 对库坝区渗漏问题,要加强环境工程地质监测。对坝基部位已经产生的渗漏问题,要注意进一步

查明其渗漏通道,采取强有力的抗渗补救措施。同时应注意沿断层带渗流可能产生的渗透变形等问题的出现。

c. 小浪底水库诱发地震的可能性是存在的,尤其要加强对库首坝址区可能诱发地震的活动性断层的变形监测。水库诱发地震是在库水荷载诱发作用下构造地震的一种特殊形式。目前正值水库蓄水期,也是水库诱发地震监测的关键时期,掌握蓄水过程中库区地震的活动水平及规律,是水库诱发地震分布空间、强度及主震发生时间预测预报中重要的基本资料。建议有关部门切实做好蓄水过程水库诱发地震监测工作,及时分析处理好有关地震事件,为进一步准确预测可能发生的水库诱发地震灾害积累可靠的第一手资料。

### 参考文献:

- [1] 张勤,厉渝生.黄河小浪底水利枢纽工程及其特点[J].河海科技进展,1993,13(3):40~46.
- [2] 张勤,陈志坚,罗增益.裂隙岩体结构面力学参数取值的工程地质研究[J].河海大学学报,1999,27(6):114~117.

(收稿日期:2001-02-28 编辑:马敏峰)