

奴尔水利枢纽工程库区坍岸分析评价

班懿根

新疆塔里木河流域奴尔水利枢纽建设管理局, 新疆 和田 848300

[摘要]开展水库库区坍岸情况分析预测对于水库设计及兴利调度具有重要意义。该文以奴尔水库为例,在前期地质调查的基础上,对水库库区坍岸情况进行了分析评价,结果表明:前期,水库坍岸后缘边界高程 2625~2660 m,坍岸长度 260~310 m,坍岸方量 1360 万 m³。右岸坍岸后缘边界高程 2610 m,坍岸长度 900 m,坍岸方量 639 万 m³,两岸总坍岸方量约 2000 万 m³;现状,蓄水至高程 2488.04 m 时,正常蓄水位以上坍岸方量为 1488 万 m³,目前已坍岸 74%。高程 2488.04 m 以上坍岸方量为 1683 万 m³;后期,水库蓄水至正常蓄水位时(高程 2497 m),左岸预测坍岸方量尚有 335 万 m³,右岸库岸预测坍岸方量尚有 331 万 m³,预测后期坍岸总方量尚有 666 万 m³。

[关键词]奴尔水库;库区坍岸;库岸稳定性

DOI: 10.33142/hst.v6i6.9784

中图分类号: TV135

文献标识码: A

Analysis and Evaluation of Bank Collapse in the Reservoir Area of the Nur Water Conservancy Control Project

BAN Yigen

Xinjiang Tarim River Basin Nur Water Conservancy Hub Construction Management Bureau, Hotan, Xinjiang, 848300, China

Abstract: Conducting analysis and prediction of bank collapse in reservoir areas is of great significance for reservoir design and operation. This article takes the Nur Reservoir as an example and analyzes and evaluates the situation of bank collapse in the reservoir area based on the preliminary geological survey. The results show that in the early stage, the boundary elevation of the rear edge of the reservoir bank collapse was 2625-2660 meters, the length of the bank collapse was 260-310 meters, and the volume of bank collapse was 13.6 million cubic meters. The boundary elevation of the rear edge of the right bank collapse is 2610m, the length of the collapse is 900 meters, and the collapse volume is 6.39 million m³. The total collapse volume on both sides is about 20 million m³; At present, when the water level reaches an elevation of 2488.04 m, the amount of bank collapse above the normal water level is 14.88 million m³, and 74% of the bank has already collapsed. The amount of bank collapse above an elevation of 2488.04 m is 16.83 million m³; In the later stage, when the reservoir reaches its normal storage level (at an elevation of 2497 m), the predicted amount of bank collapse on the left bank is still 3.35 million m³, and the predicted amount of bank collapse on the right bank is still 3.31 million m³. The total predicted amount of bank collapse in the later stage is still 6.66 million m³.

Keywords: Nur Reservoir; bank collapse in the reservoir area; reservoir bank stability

1 工程概况

奴尔水利枢纽位于新疆策勒县,是一座以灌溉、发电为主要功能的枢纽工程。水库总库容为 0.69 亿 m³,正常蓄水位为 2497m,死水位 2465m,电站总装机容量为 6.2MW,多年平均年发电量为 0.217 亿 kW·h。工程由拦河坝、导流兼泄洪冲砂洞、溢洪洞、发电引水系统及电站厂房等组成。大坝为碾压式沥青混凝土心墙坝,最大坝高 80m。工程地震设防烈度为Ⅷ度。

2 库区地质条件

奴尔水利枢纽工程水库区滑坡主要位于奴尔河河谷两岸 I~IV 阶地及后缘谷之上。水库设计正常蓄水位 2497m,水库迳水长约 4.2km。河谷两岸山体为低山区,海拔高程 2660~3100m,河谷与两岸山体高差约 200~500m,为宽“U”型谷,谷底宽 300~400m,河水由南西流向北东,库区河水高程 2423~2497m,河床比降 18%,

主河床宽 10~60m,河漫滩宽 280~390m。库区内两岸发育有 I~IV 阶地,其中 III、IV 级阶地左岸广泛分布,右岸零星分布。

库区两岸表层分布大量的风积粉土,下部为阶地砂砾石及西域砾岩。库区范围内构造不发育,无褶皱现象,也未发现断层,节理裂隙不发育。

为查明库区坍塌、塌滑分布、范围、规模,以及坍岸预测、坍岸入库方量、涌浪高度,根据库区的地形地貌、岩土分布等情况进行了库区两岸边坡的工程地质勘察工作,勘探工作主要是进行工程地质测绘,结合钻探、物探、试验等方法^[1-2]。

库区以玉其库龙河与奴尔河汇合口为界,可分为两部分:①坝址区至汇合口段,长约 0.9km。左岸坡度为 50°~90°,主要出露地层为西域砾岩,岸坡整体稳定,未发现卸荷岩体;右岸边坡坡度为 22°~37°,岩土体均为

第四系上更新统风积粉土，据物探及钻孔资料，厚度为20~71m，粉土岸坡总体呈稳定状态，但局部已形成浅层土滑坡。②汇合口至库尾。左岸边坡坡度为25°~36°，均被风积低液限粉土所覆盖，据物探及钻孔资料，厚度为40~50m；右岸为Q1西域砾岩组成的岩质陡坡或陡坎。

粉土为低液限粉土^[3-5]，>0.075mm的细砂含量平均值占1.1%~4.0%，0.075~0.005mm的粉粒含量平均值占91.1%~93.1%，<0.005mm的粘粒含量平均值占4.9%~5.8%，风积粉土粘粒含量低，液限平均值27.8%~28.4%，塑限平均值18.3%~19.0%，塑性指数平均值9.4，天然干密度1.26~1.36g/cm³，天然含水率为2.4%~6.1%，比重为2.70，纵波速度V_p为300~530m/s，天然状态下直剪试验内摩擦角为19°~20°，黏聚力为12.7~20.6kPa；饱和状态下内摩擦角为17.5°~19.0°，黏聚力为16.9~20.6kPa。

根据库区工程地质条件，库岸为基岩边坡和粉土边坡，主要存在崩塌和库岸再造问题。其中基岩边坡主要分布的BT₁、BT₂在库区属于规模较大的不稳定体，后缘拉裂面倾角一般80°~90°，近直立，其破坏形式主要为坍塌，方量不大，且部分位于正常蓄水位以下，坍塌所产生的涌浪高度小，对大坝基本无影响；粉土边坡在水库蓄水后，库岸自然条件将会发生急剧变化，库水位以下土体处于饱和状态，抗剪强度将会大幅下降，加之水位附近土体的冲刷及掏蚀作用，使得土坡在重力作用下发生变形破坏，破坏形式将主要表现为坍塌、滑塌，形成库岸再造^[6-7]。

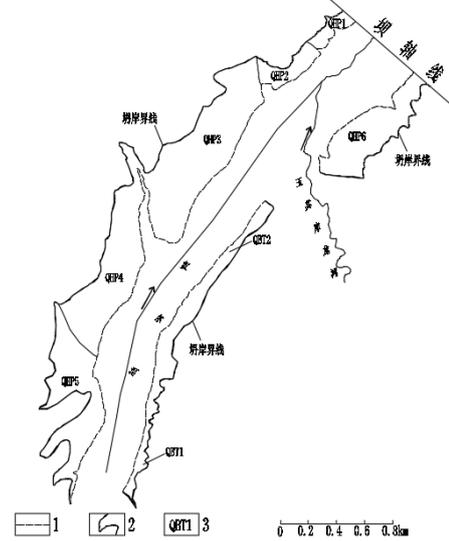
奴尔水利枢纽工程水库库区滑塌、崩塌形成库岸再造，带来了一系列危害。其中，涌浪是最显著的危害之一。由于库区岸坡的粉土易于被水流冲刷和剥蚀，岸坡再造后，未能有效加固的岸坡会在水体冲刷下形成涌浪。涌浪会对水库岸坡和附近的土地造成巨大冲击力，造成土壤的疏解和沉积物的搬运，进而导致岸坡的破坏和侵蚀。这种涌浪的危害不仅会对水库的稳定性产生直接威胁，还会对水库周围的农田、城镇和交通设施等造成严重破坏，给人们的生活和财产安全带来重大风险^[8,9]。

3 前期岸坡分析评价

经调查，库区岸坡粉土的分布范围广泛，其厚度较大，这意味着在进行库岸再造和增加库区淤积时，面临的危害性较大。粉土是一种细颗粒的土壤类型，其颗粒之间的结构相对较松散，容易受水流冲刷和侵蚀的影响。因此，在进行岸坡再造时，粉土很容易被冲刷和剥蚀，从而导致库岸不稳定和水土流失的问题，形成的库岸再造和增加库区的淤积危害性较大。根据粉土分布范围、位置将岸坡分为6个区(QHP1~QHP6)，见岸坡分区(图1)。

通过工程区试验成果，粉土黏粒含量极少，约3~5%，为低液限粉土，根据《水利水电工程地质手册》进行库岸坍塌预报分析计算，粉土厚度采用钻孔资料及物探实测成

果；浅滩冲刷后水下稳定坡角，通过试验成果及相邻地区边坡稳定经验值比较，确定取12°；β为岸坡水上稳定坡角，经本地区边坡稳定坡角统计及综合考虑岩土状况，确定取27°。进行坍塌土体体积计算，水库库岸坍塌量见表1。



1. 水库回水位线 2. 坍岸界线 3. 坍岸分区编号

图1 水库坍岸示意

表1 库岸坍塌量汇总

编号	类型	岸别	距坝址距离/km	分布高程/m	面积/万m ²	厚度/m	预测方量/万m ³
QHP1	粉土坍岸	左岸	0~0.33	2497~2575	2.25	0~52	17.16
QHP2	粉土坍岸	左岸	0.33~0.79	2497~2575	9.94	0~7	24.25
QHP3	粉土坍岸	左岸	0.79~2.14	2497~2655	47.25	40~50	1018.55
QHP4	粉土坍岸	左岸	2.14~3.07	2497~2660	79.52	0~32	236.89
QHP5	粉土坍岸	左岸	3.07~4.45	2497~2610	26.81	0~7	63.81
QHP6	粉土坍岸	右岸	0~4.05	2497~2602	21.56	0~37	639.23
QBT1	基岩崩塌	右岸	3.35	2497~2500	—	5	0.30
QBT2	基岩崩塌	右岸	1.60	2497~2505	—	5~7	1.38

从计算结果来看，库区坍岸近坝左岸QHP1、QHP2分布在正常蓄水位附近，目前蓄水位未达到该高程，尚未产生坍岸。左岸库尾QHP5，当前蓄水位附近出露砂砾石层，预计未来坍岸量较小。坍岸主要分布在左岸QHP3、QHP4、右岸QHP6区。

QHP3坍岸区，位于左岸大坝上游0.9km至2.14km处，长1.24km，分布3级阶地，该阶段地面前缘高程2452~

2475m, 河床高程 2431~2460m, 阶地面高于河床约 15~19m。阶地面以下为地形坡度为 60° ~ 68° , 分布基地砂砾石; 阶地面以上为地形坡度为 30° ~ 38° , 被粉土覆盖。经计算, 水库建成蓄水后, 库岸坍塌预测方量约 1020万 m^3 , 坍塌宽度 250~420m, 坍塌最宽处高程为 2655m 附近。

QHP4 坍塌区, 位于左岸大坝上游 2.14km 至 3.07km 处, 长 0.93km, 分布 2 级阶地, 该段阶地面前缘高程 2475~2478m, 河床高程 2468~2470m, 阶地面高于河床约 6~8m。阶地面以下为地形坡度为 32° ~ 55° , 分布基地砂砾石; 阶地面以上为地形坡度为 24° ~ 30° , 被粉土覆盖。经计算, 水库建成蓄水后, 库岸坍塌预测方量 237万 m^3 , 坍塌宽度 240~340m, 坍塌最宽处高程为 2625m 附近。

QHP6 坍塌区, 位于右岸大坝上游 0.9km 范围内(即大坝至玉其库龙河冲沟), 该处大部分均粉土覆盖, 仅个别冲沟处出露砂砾石。右岸边坡坡度为 22° ~ 37° , 据物探及钻孔资料, 厚度为 20~71m。经计算, 水库建成蓄水后, 库岸坍塌预测方量 639万 m^3 , 坍塌宽度 260~310m, 坍塌最宽处高程为 2610m 附近。

通过上述坍塌分析, 水库左岸坍塌宽度 240~420m, 坍塌后缘边界高程 2625~2660m, 坍塌长度 260~310m, 坍塌方量 1360万 m^3 ; 右岸坍塌宽度 260~310m, 坍塌后缘边界高程 2610m, 坍塌长度 900m, 坍塌方量 639万 m^3 , 两岸总坍塌方量约 2000万 m^3 。坍塌范围内无居民区、工程建筑物及交通道路, 库区坍塌以崩塌、滑塌形式为主, 逐渐坍塌, 产生的涌浪很小, 对大坝安全影响不大, 库岸再造增加了库区下部的淤积。

4 现状坍塌分析评价

奴尔水利枢纽工程于 2018 年 8 月 5 日进行初期下闸蓄水, 水位限制在 2475.00m 以下, 2019 年 8 月 25 日进行的二期下闸蓄水, 2019 年 9 月 25 日蓄至历史最高水位 2488.04m, 截至到 2019 年 11 月 16 日库水位为 2479.20m。水库蓄水过程中, 库岸自然条件发生急剧变化, 在库水位变化范围内的土体处于饱和状态, 抗剪强度下降, 加之库水对库水位附近土体冲刷及掏蚀作用, 使得土坡在重力作用下发生变形破坏, 破坏形式将主要表现为土体坍塌、滑塌。

此外, 根据数据分析计算, 当前水位下, 高程 2488.04m 至 2497.00m 之间的坍塌方量约为 1488万 m^3 , 占到了正常蓄水位以上的坍塌方量的 74%。而在高程 2488.04m 以上的范围内, 坍塌方量更是达到了 1683万 m^3 。这些数据展现了当前蓄水位下坍塌的严重程度和规模。可以看出, 坍塌现象已经相当严重, 需要采取相应的措施来维护水库的安全性和稳定性。同时, 这也给相关部门提供了重要的参考依据, 以便制定有效的维护计划和措施。

5 后期蓄水坍塌预测

根据库区现状已经坍塌的水上、水下坡度统计, 水下坡度 6° ~ 12° , 水上坡度 30° ~ 40° 。结合前期勘察资

料, 进一步分析预测水库蓄水至高程 2497m(正常蓄水位)时库区坍塌情况。

(1) 左岸 QHP1 坍塌区, 位于大坝上游 0.33km 内, 该区粉土在施工过程中已清除, 此区不存在粉土坍塌问题。

(2) 左岸 QHP2 坍塌区, 位于大坝上游 0.33km 至 0.90km 处, 该区阶地砂砾石及基岩顶板出露高程 2485~2497m, 现阶段蓄水位大部分未到粉土界线高程, 坍塌尚未产生, 后期库水蓄至高程 2497m(正常蓄水位)时, 粉土坍塌方量 24万 m^3 , 坍塌宽度 173m, 坍塌高程 2593m。

(3) 左岸 QHP3 坍塌区, 位于大坝上游 0.9km 至 2.14km 处, 该区阶地砂砾石及基岩顶板出露于高程 2465~2475m, 以上均分布巨厚粉土, 根据前期物探、钻探成果以及现状坍塌的水下、水上坡度分析预测, 库水蓄至高程 2497m(正常蓄水位)时, 坍塌方量 1198万 m^3 , 坍塌宽度 419m, 坍塌高程 2678m。现状已坍塌方量 1039万 m^3 。

(4) 左岸 QHP4 坍塌区, 位于左岸大坝上游 2.14km 至 3.07km 处, 该区阶地砂砾石及基岩顶板出露于高程 2465~2477.5m, 库岸表层分布巨厚粉土, 根据前期物探成果以及现状坍塌的水下、水上坡度分析预测, 后期库水蓄至高程 2497m(正常蓄水位)时, 坍塌方量 276万 m^3 , 坍塌宽度 341m, 坍塌高程 2618m。现状已坍塌方量 179万 m^3 。

(5) 左岸 QHP5 坍塌区, 位于左岸大坝上游 3.07km 至 4.05km(库尾)处, 库岸部分位于阶地砂砾石内, 无粉土坍塌现象, 后期库水蓄至高程 2497m(正常蓄水位)时, 粉土坍塌方量 55万 m^3 , 坍塌宽度 179m, 坍塌高程 2562m。

(6) 右岸 QHP6 坍塌区, 位于大坝右岸 0~0.9km 处, 前期预测滑方量 600万 m^3 , 现状已坍塌方量 269万 m^3 。根据坍塌现状分析预测, 后期库水蓄至高程 2497m(正常蓄水位)时, 粉土坍塌方量尚有 331万 m^3 , 坍塌宽度 328m, 坍塌高程 2622m。

根据以上分析, 后期水库蓄水至高程 2497.00m(正常蓄水位)时, 左岸库岸预测坍塌方量尚有 335万 m^3 , 右岸库岸预测坍塌方量尚有 331万 m^3 , 预测后期坍塌总方量尚有 666万 m^3 。

6 结语

综上所述, 在奴尔水利枢纽工程库区坍塌分析评价的研究中, 我们通过对库区现状的水上、水下坡度统计, 得出了库区蓄水至高程 2497m 时的坍塌情况预测。根据统计结果, 水下坡度将增加, 导致水库库区内水土流失加剧, 进一步增加了库区坍塌的风险; 水上坡度将达到较陡的 30° 至 40° , 使库区内的土壤更容易下滑、坍塌, 增加库区的不稳定性和不安全性。因此, 对于奴尔水利枢纽工程库区坍塌问题, 我们必须采取相应的措施来加固库区, 确保水库的安全稳定。这个研究结果对于相关部门在维护计划和措施的制定中提供了重要的参考和指导。具体的研究结果如下:

(1) 蓄水运行以来, 水库坍岸的位置与前期库岸再造预测基本一致, 左、右岸坍岸方量及坍岸宽度均未达到前期坍岸预测值。

(2) 水库蓄水运行以来, 粉土坍岸速度较快, 目前已完成前期预测坍岸量的 74%, 若库水位不继续抬升, 坍岸的速度会减小, 并趋于稳定。

(3) 目前水库历史最高蓄水位为 2488.04m, 距正常蓄水位 2497m 尚有 8.96m, 后期蓄水至 2497m (正常蓄水位), 后期坍岸总方量尚有 666 万 m^3 。坍塌粉土进入库内, 会增加水库的淤积。建议加强水库淤积监测并合理选择运行方式, 以降低坍岸影响, 确保水库正常运行。

(4) 蓄水运行以来, 坍岸未发现整体滑塌, 以小规模滑塌、崩塌为主, 没有形成大的涌浪, 库区坍岸对大坝安全无影响。

[参考文献]

[1] 陈战武, 赵量. 马莲河水库坍岸影响区征地研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 145-147.
[2] 司富安, 李坤, 段世委. 第二松花江堤防险情类型及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2020(11): 117-119.

[3] 赵宇. 横泉水库左岸边坡稳定性分析及评价[J]. 山西水利科技, 2019(3): 17-19.

[4] 李飞. 青山水库滑坡坍岸变形体治理方案比选[J]. 东北水利水电, 2019, 37(5): 8-10.

[5] 袁东成, 戴陈梦子. 沅水流域梯级水电站安全风险调查及对策措施研究[J]. 大坝与安全, 2019(1): 10-13.

[6] 郭雅丽. 水库蓄水塌岸~库岸再造剖析[J]. 水科学与工程, 2018(4): 4-7.

[7] 闫林, 杨秀娟, 樊恒辉. 水位变化诱发均质黄土库岸失稳试验研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 267-271.

[8] 史海燕, 李大乐. 某水库库区滑坡体稳定性分析及对策研究[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(8): 102-104.

[9] 刘强. 太谷县下安水库工程库区库岸稳定性分析[J]. 山西水利科技, 2016(1): 24-26.

作者简介: 班懿根 (1975.12—), 毕业院校: 石河子大学工学院, 所学专业: 农田水利工程, 当前就职单位: 疆塔里木河流域巴音郭楞管理局, 职务: 党委委员、博斯腾湖管理处党总支副书记、处长, 当前职称级别: 副高级职称。