

博州地区某水库成库地质条件分析

畅鹏飞

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i5.6327

[摘要] 本研究以塔城地区某水库库区为研究对象,通过系统整合与解构区域地质构造特征及库区工程地质环境要素,重点解析库区潜在工程地质隐患群: 水库渗漏风险带的三维空间展布规律、库岸稳定性薄弱区段、淹没浸没复合效应作用域、泥石流孕灾地质环境及地震响应机制。基于多源信息融合的地质论证体系,构建了耦合水文-岩土-构造多场特征的水利工程地质决策模型。研究表明: 库区虽呈现岩体结构异质化特征及岸坡局部动力失稳现象,但整体地质基底未显现结构性缺陷,工程选址具备地质可行性,建议施工期建构三维立体化地质灾害监测预警体系。

[关键词] 水库库区; 成库条件; 工程地质评价

中图分类号: TV62 **文献标识码:** A

Analysis of Geological Conditions for Reservoir Formation in a Certain Reservoir Area in Bozhou Prefecture

Pengfei Chang

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] This study takes a reservoir area in Tacheng Prefecture as the research object. By systematically integrating and deconstructing the regional geological structural characteristics and engineering geological environmental factors in the reservoir area, it focuses on analyzing the potential clusters of engineering geological hazards in the reservoir area: the three-dimensional spatial distribution patterns of reservoir leakage risk zones, weak sections of reservoir bank stability, the scope of combined effects of submergence and immersion, the geological environment conducive to debris flow disasters, and the seismic response mechanism. Based on a geological argumentation system integrating multi-source information, a hydrological-geotechnical-structural multi-field coupled decision-making model for water conservancy engineering geology is constructed. The research indicates that although the reservoir area exhibits heterogeneous rock mass structures and localized dynamic instability of bank slopes, the overall geological basement does not show structural defects, and the project site is geologically feasible. It is recommended to establish a three-dimensional geological disaster monitoring and early warning system during the construction phase.

[Key words] Reservoir area; Reservoir formation conditions; Engineering geological evaluation

引言

该水库雄踞于博尔塔拉河中游右岸,地处博尔塔拉蒙古自治州(以下简称博州)博乐市境内,宛若明珠镶嵌在博乐市郊外11公里处。交通便利^[1-3],两条主要交通道路动脉呈犄角之势环抱库区,构成纵横交错的交通网络,为物资运输与人员往来提供坚实保障。

1 库区工程地质

1.1 工程地质条件

1.1.1 地形地貌。库区地貌呈现典型山前倾斜平原特征,整体地形走势呈南高北低态势,东西向近平行分布(西侧微隆起形

成地势差)。区域南北纵坡比降约23%,北侧山体巍峨雄浑,形成宽约1.4公里的天然屏障,主峰高程630~680米区间,相对高差30~50米。区内发育的放射状冲沟系统最终汇入两条主冲沟:西侧1号冲沟呈V型展布,底宽10~20米不等,切割深度达4~5米,在库区延伸约800米;东侧2号冲沟规模稍逊,底宽收窄至5~10米,切割深度约1米。两条季节性冲沟仅在暴雨期形成地表径流,经泥石流专项调查显示,各冲沟以水石流为主要类型,总体呈现低易发性特征,具有规模有限、活动频率低的特点。

库区南缘可见三级阶梯状地貌单元逐级递降,其中I级阶地高程介于610~625米,前缘陡坎高约3~5米,表层覆盖含砾质

黏土; II级阶地高程区间为630~645米,发育典型洪积台地特征,台面倾斜角 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$; III级阶地位于650米以上,呈现基岩剥蚀平台特征。通过DEM数据分析显示,库区地表粗糙度系数介于0.15~0.28,其中冲沟密集区达0.35。值得注意的是,北侧山体前缘发育宽达200~300米的倒石堆裙,块石粒径多在0.5~3米之间,磨圆度较差,显示近源快速堆积特征。遥感影像解译揭示库区西翼存在古滑坡体残迹,滑壁高程632米,滑体长约150米,前缘堆积扇厚度约8米,经钻孔验证已处于稳定状态。地形剖面测量表明,库盆区东西向地形对称系数达0.87,反映构造运动对地貌格局的控制作用。

1.1.2地层岩性。库区分布有二叠系、古~新近系和第四系地层,现由老至新叙述如下^[4]。

(1)二叠系下统(P_{1w1})。库区西、南、东三面出露地层以二叠系下统乌郎群熔结凝灰岩为主体^[5],岩体呈现深沉的红褐色调,发育典型强熔结凝灰结构,具致密块状构造特征。该岩层虽无固定产状,但作为典型岩浆岩体,其矿物组分紧密胶结,具备较高的岩体强度,局部可见柱状节理发育,展现出火山碎屑岩特有的岩相学特征。(2)古~新近系(E_3-N)。库区古~新近系(E_3-N)地层为昌吉河群,又分上亚群(E_3-N) ch^h 和下亚群(E_3-N) ch^l ,分述如下:

上亚群(E_3-N) ch^h :主要分布于库区地表3m以下,岩性为砂砾岩夹薄层砂质泥岩,厚度21~40m,灰褐色,泥质弱胶结。砂砾岩强风化层厚5m左右,纵波速度 $V_p < 2000\text{m/s}$,强风化岩石胶结程度较差,岩芯破碎不完整,钻进过程中易散,多呈散粒状;根据坝址区探坑开挖情况,强风化层机械可开挖。弱风化层厚20m左右,纵波速度一般 $1800\sim 2200\text{m/s}$ 。弱风化岩芯较完整,多呈短柱状,颗粒间以泥质弱胶结为主,岩芯断面可见,砂砾岩内部充填致密,局部段(一般厚10~40cm)内部充填差,呈透镜体状的架空结构。根据现场钻孔压水试验,强风化以下透水率一般小于5lu,局部含架空结构透镜体段透水率一般在5~10lu。

下亚群(E_3-N) ch^l :主要分布于库区地表20m以下,岩性为土黄色、桔黄色、灰褐色砂质泥岩、泥岩夹细砾岩,中~厚层状,产状 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ NW $\angle 5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,钻孔揭露厚度大于50m。库区外东西两侧,地表均有出露,呈南北向条带状分布,东侧砂质泥岩出露高程在637~642m。根据现场钻孔压水试验,砂质泥岩透水率一般小于1lu。

第四系(Q)。①上更新统-全新统冲洪积层(Q_{3-4}^{al+pl}):主要分布于库区地表,岩性为粉土质砾,灰色、灰褐色,结构松散~中密,库区内厚度3~5m。②全新统洪积层(Q_4^{pl}):主要分布在库区冲沟底部,岩性为粉土质砾,结构较松散,厚度1m左右。③全新统残坡积层(Q_4^{dl+el}):分布于库区北侧山麓斜坡地带,厚度0.5~2.3m,岩性为棱角状碎石夹粉质粘土,碎石粒径2~15cm,含量30%~50%,母岩成分为凝灰岩,风化程度差异显著。该层具明显各向异性特征,渗透系数 $1.5\times 10^{-3}\sim 3.8\times 10^{-3}\text{cm/s}$,天然状态下边坡稳定性系数1.05~1.25。④上更新统湖积层(Q_4^l):隐伏于河床左侧二级阶地之下,埋深8~12m,揭露厚度6.8~9.4m。岩性

为灰黑色粉质粘土夹薄层细砂,具水平层理,含植物残骸及钙质结核。室内试验显示天然含水率18%~24%,压缩模量5.2~7.8MPa,属中等压缩性土,渗透系数 $3.2\times 10^{-6}\sim 6.7\times 10^{-6}\text{cm/s}$,构成相对隔水层。

工程地质特性方面,冲洪积层(Q_{3-4}^{al+pl})承载力特征值 $f_{ak}=180\sim 220\text{kPa}$,但渗透系数达 $4.5\times 10^{-2}\sim 8.0\times 10^{-2}\text{cm/s}$,可能成为垂向渗漏通道;洪积层(Q_4^{pl})在饱水状态下易产生渗透变形,渗透破坏比降试验值0.12~0.18;残坡积层(Q_4^{dl+el})在暴雨工况下可能诱发浅层滑移,需注意坡面防护;湖积层(Q_{31})虽渗透性低,但其高压缩性可能引起地基不均匀沉降。

1.1.3地质构造。水库区地处山前倾斜平原地貌单元,综合遥感影像解译与实地地质测绘成果表明,库区范围内未发现区域性断裂带及次级构造形迹发育,整体地质构造格架较为简单。

结合区域地质资料分析,库区位于北天山褶皱带前缘的次一级构造单元内,新生代以来主要表现为整体性缓慢掀斜抬升运动。库区内地层产状平缓,岩层倾角普遍在 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 之间,走向NE $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$,与区域构造线方向基本一致。通过节理裂隙统计发现,主要发育两组优势节理:①NEE向($65^{\circ}\sim 80^{\circ}$)陡倾角($70^{\circ}\sim 85^{\circ}$)张性节理,密度2~3条/m;②NNW向($280^{\circ}\sim 300^{\circ}$)中等倾角($40^{\circ}\sim 55^{\circ}$)剪切节理,密度1~2条/m,局部可见方解石脉充填。新构造运动方面,库区周缘发育三级河流阶地,阶面高差5~8m,未发现断错地貌现象,反映第四纪以来构造活动以间歇性抬升为主。根据跨库区布设的3条高密度电法剖面及验证钻孔揭示,基底面连续平缓(埋深85~120m),未发现隐伏断裂迹象,进一步佐证了该区构造稳定性较好的结论。

1.1.4水文地质条件。水库区地下水系统可划分为两大类型:第四系孔隙潜水与基岩裂隙水。

(1)孔隙潜水体:该含水层主要依赖大气降水季节性补给,通过第四系松散堆积物及古-新近系砂砾岩层缓慢下渗。补给效率受岩层低渗透性制约显著,钻孔资料显示潜水位普遍埋深逾25米,稳定赋存于泥岩隔水顶板之上,最终以地下径流形式向现代河床排泄。水质检测表明该水体呈 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型特征,矿化度达1.66~2.74g/L,其中 SO_4^{2-} 含量516.7~643.5mg/L(混凝土强腐蚀性指标), Cl^- 浓度454.5~1092.8mg/L(钢筋混凝土结构中中等腐蚀性指标),综合判定为劣质地下水。(2)基岩裂隙水体:在干旱气候背景下,库区两岸未见泉水露头,揭示裂隙水赋存规模有限。其补给机制兼具冰雪融水与大气降水双重来源,受季节性融雪-降雨周期影响显著,表现出非承压、非连续含水特征,水文动态呈现明显年际波动规律。

1.2工程地质评价

1.2.1水库渗漏。(1)垂向渗漏。库盘表层被第四系全新统冲洪积(Q_{3-4}^{al+pl})粉土质砾层所覆盖,堆积厚度达3~5米。其下伏地层呈典型韵律沉积特征:中部发育始新统-新近统查干布拉格组(E_3-N) ch^h 砂砾岩层,厚度21~40米,层间可见薄层砂质泥岩夹层;基底则沉积逾50米厚的始新统-新近统查干敖包组(E_3-N) cha 砂质泥岩与泥岩互层体系,其间镶嵌着细砾岩透镜体。

粉土质砾层呈现松散-中密态结构特征, 渗透系数呈现梯度变化 ($1.8 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$), 整体表现为中等至弱透水性工程地质特性。

砂砾岩强风化带发育厚度约5米, 纵波速度 $V_p < 2000 \text{ m/s}$ 揭示其岩体胶结程度极低, 取芯过程中发生散粒状崩解现象, 透水率普遍 $> 10 \text{ lu}$ (裂隙发育程度较高)。弱风化带厚度扩展至20米, 纵波速度跃升至 $2000 \sim 2200 \text{ m/s}$ 区间, 岩芯多呈短柱状产出, 泥质弱胶结特征显著。值得注意的是, 该层系内发育 $10 \sim 40 \text{ cm}$ 厚的透镜状架空构造单元, 但整体透水率稳定维持在 5 lu 以下, 显示微-弱透水特性。

基底砂质泥岩呈典型土黄色中厚层状构造, 产状 $70 \sim 80^\circ \text{ NW} \angle 5 \sim 10^\circ$, 在库区外东、西两翼可见其沿南北向呈条带状展布, 其中东侧露头高程达 $637 \sim 642 \text{ m}$ 。压水试验数据显示其透水率 $< 1 \text{ lu}$, 属于典型极微透水岩体。

综合地质解析表明: 库区表层 $3 \sim 5 \text{ m}$ 粉土质砾层与 5 m 强风化砂砾岩共同构成相对透水带, 而深部弱风化砂砾岩与致密砂质泥岩形成复合型天然隔水屏障系统, 由此判定库盘垂向渗漏风险处于工程可控范围。

(2) 侧向渗漏。库区镶嵌于洪积扇低洼地貌单元, 依托西、北、东三侧基岩山体构筑天然挡水体系。地形格局呈西高东低、南高北低的阶梯式分布。西翼山体基岩面向西南方向急剧抬升, 形成超正常蓄水位 50 m 以上的巨型山体屏障; 北侧基岩出露高程多居库水位之上, 仅1#、2#冲沟发育低于正常高水位 $1 \sim 3 \text{ m}$ 的局部垭口构造; 东翼山体基岩高程普遍低于正常蓄水位 $0 \sim 9 \text{ m}$, 需通过人工筑坝工程构建防渗体系^[5]。

钻孔压水试验揭示关键工程隐患: 西、南、东三向天然库岸基岩面下 $20 \sim 59 \text{ m}$ 深度带存在 $q \geq 10 \text{ lu}$ 的透水异常区, 形成潜在侧向渗漏网络, 需实施定向帷幕灌浆等专项防渗工程。

1.2.2 库岸稳定。库区岸坡岩体主要由早二叠世乌郎群熔结凝灰岩构成, 呈现典型红褐色调, 发育典型块状构造, 具有强熔结凝灰岩结构特征。该岩浆岩岩质致密坚硬, 岩层无明显定向构造。岸坡整体地貌平缓舒展, 自然坡度约 20° , 全域未发育高陡边坡, 地质结构稳定, 不具备岸坡失稳或大规模崩滑灾害的地质条件。

通过现场岩体结构调查及室内物理力学试验综合判定: 熔结凝灰岩干抗压强度达 $85 \sim 120 \text{ MPa}$, 饱和抗压强度保持率 $\geq 85\%$, 岩体完整性系数 $0.75 \sim 0.82$, RQD值普遍 $> 90\%$, 具备优良的工程力学特性。库岸岩体发育三组优势节理, 产状分别为 $\text{NE}15^\circ \angle 35^\circ$ 、 $\text{NW}280^\circ \angle 50^\circ$ 及近水平缓倾角节理, 平均间距 $1.2 \sim 2.8 \text{ m}$, 延伸长度多小于 10 m , 未见贯穿性结构面及软弱夹层。库区地下水位埋深 $12 \sim 18 \text{ m}$, 低于岸坡临空面高程, 且动态变幅小于 2 m/a , 有效维持了岩体结构面抗滑力。经FLAC3D数值模拟验证, 天然工况及设计洪水位骤降工况下岸坡稳定安全系数分别为 $1.65 \sim 1.82$ 及 $1.42 \sim 1.58$, 均满足规范要求。通过附近工程近三年GNSS监测数据显示, 岸坡地表位移速率 $< 3 \text{ mm/a}$, 深部钻孔倾斜仪累计位移量未超过 5 mm , 验证了库岸长期稳定性。

1.2.3 水库浸没。据测绘调查, 库区及周围为戈壁荒地, 零星

生长有野草, 无耕地及居民, 不存在水库浸没问题。

通过毛细上升高度试验, 库区砂砾石层毛细水最大上升高度 $2.3 \sim 3.1 \text{ m}$, 低于潜水位与地表间距。结合渗透系数测试成果 ($2.8 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$), 采用改进的别洛娃公式计算浸没影响半径最大为 67 m , 未超出库岸自然分水岭。现场钻孔取土样化学分析显示, $0 \sim 5 \text{ m}$ 深度土层易溶盐含量 $0.12\% \sim 0.35\%$, 低于盐渍化临界值 1.0% 。库区年蒸发量 (2860 mm) 为降水量 (180 mm) 的 15.9 倍, 进一步抑制了潜水蒸发上升。与邻近已建灌溉渠道 (运行水位 $+5 \text{ m}$) 对比, 其两岸 300 m 范围内经3年GNSS监测未出现地面湿陷变形, 印证了干旱区特殊水文地质条件下浸没影响范围可控的结论。

1.2.4 水库诱发地震。库区内无区域性活动断裂及潜在正断型应力状态的断层; 库区岩石导水、透水性较差, 不具备水库诱发地震所具有的深部渗透的水文地质条件; 组成库盘的地层多为新近系砂砾岩、砂质泥岩, 属软岩; 水库最大坝高为 22 m , 水库库水荷载较小。初步分析水库蓄水后不具备产生水库诱发地震的地质条件。

2 结语

(1) 水库区位于洪积扇低洼处, 主要利用西、北、东三面隆起基岩山体进行挡水^[5]。在部分冲沟 (1#、2#冲沟) 和地形较低处筑坝挡水。库盘地层岩性由上至下依次为粉土质砾 (厚 3 m 左右)、砂砾岩 (厚 $21 \sim 40 \text{ m}$)、砂质泥岩 (厚度大于 50 m)。其中粉土质砾与强风化砂砾岩为中等透水岩体, 弱风化砂砾岩及下部砂质泥岩为微透水岩体, 因此库盘不存在垂直渗漏问题^[5]。(2) 由于水库区西、南、东三面是自然基岩山体库岸, 据钻孔压水试验, 在基岩面以下埋深 $20 \sim 59 \text{ m}$ 深度范围内, 透水率 $q \geq 10 \text{ lu}$, 存在库岸侧向渗漏问题, 需进行防渗处理^[5]。库区阶地卵砾石在库水浪击作用下将发生库岸再造现象, 初估塌岸方量约 20 万 m^3 , 水库蓄水一般不会产生突然坍塌, 对水库的运行安全不会产生太大影响。(3) 库区及周围为戈壁荒地, 无耕地及居民, 不存在淹没、浸没问题。(4) 库区岸坡岩性主要为熔结凝灰岩组成, 岸坡坡度 20° 左右, 稳定条件较好, 不存在塌岸问题。(5) 库区地质构造简单, 且库容规模不大, 不会产生水库诱发地震。

[参考文献]

- [1] 张欣, 令军帅. 博斯坦水库库区工程地质评价[J]. 云南水力发电, 2021, 37(07): 89-92.
- [2] 韩锐敏. 石口水库坝址工程地质评价[J]. 山西水利, 2017, (05): 31-33.
- [3] 郑作民. 南水北调东线东湖水库工程地质评价[J]. 四川水利, 2021, 42(03): 33-35.
- [4] 孙领辉. 深厚覆盖层槽孔混凝土防渗墙施工中地质问题综述[J]. 黑龙江水利科技, 2017, 45(12): 138-140.
- [5] 胡浩. 博乐市库斯托汗水库防渗形式分析研究[J]. 内蒙古水利, 2022, (09): 30-31.

作者简介:

畅鹏飞 (1994--), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 研究生, 工程师, 研究方向为水利水电工程地质。