

博州某水库坝址区工程地质条件及坝型优选

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.v9i6.6400

[摘要] 本研究以博州某水库坝址区为研究对象,系统开展了坝址区地形地貌、地层岩性及水文地质特征分析,构建了三维工程地质模型。通过岩土力学试验与地质构造解析,系统梳理出坝基渗透稳定、边坡抗滑稳定及地震液化风险等关键工程地质问题。针对当地材料特性,对沥青心墙坝与土工膜斜墙坝两种坝型开展综合比选分析,重点从坝基处理难度、防渗体系适应性及构造带影响等方面进行系统性论证。研究表明:两种坝型选址区域均未发现颠覆性地质缺陷,具备满足规范要求的地质承载条件;沥青心墙坝在基岩接触带处理方面具备优势,而土工膜斜墙坝对冲积层适应性更佳,建议结合工程投资效益及施工可行性开展多维度择优。

[关键词] 水库坝址区; 工程地质条件; 坝型优选

中图分类号: TB16 **文献标识码:** A

Engineering Geological Conditions of the Dam Site Area and Optimal Selection of Dam Type for a Reservoir in Bozhou Prefecture

Pengfei Chang

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

[Abstract] This study takes the dam site area of a reservoir in Bozhou Prefecture as the research object, systematically analyzes the topography, landform, stratum lithology, and hydrogeological characteristics of the dam site area, and constructs a three-dimensional engineering geological model. Through geotechnical mechanics tests and geological structure analysis, key engineering geological issues such as dam foundation seepage stability, slope anti-sliding stability, and seismic liquefaction risk are systematically identified. Considering the local material characteristics, a comprehensive comparison and selection analysis is conducted for two dam types: asphalt core wall dam and geomembrane inclined wall dam, focusing on systematic demonstration in terms of dam foundation treatment difficulty, impervious system adaptability, and influence of structural zones. The research results indicate that no overriding geological defects are found in the selected areas for both dam types, and they possess geological bearing conditions that meet the requirements of relevant specifications. The asphalt core wall dam has advantages in dealing with the bedrock contact zone, while the geomembrane inclined wall dam exhibits better adaptability to alluvial layers. It is recommended to carry out multi-dimensional selection based on engineering investment benefits and construction feasibility.

[Key words] Reservoir dam site area; Engineering geological conditions; Optimal selection of dam type

引言

在博州某水库工程地质勘察工作中,通过系统整合坝址区地形地貌特征、地层岩性组合、地质构造展布规律及水文地质条件等多源信息,运用三维地质建模与数值模拟技术,对建坝工程地质适宜性和坝型适配性进行多维度解析,科学遴选出兼具结构稳定性与工程经济性的最优坝址。

1 工程概况

本工程核心功能定位于生态涵养供水,同步承载城市绿化

供水职能。枢纽主体由水库工程构成,经专业评估确定工程等级评定为IV等,对应小(1)型规模标准,主要建筑物按4级设计标准建设,配套建筑物执行5级规范要求。

基于可行性研究阶段优选坝址方案,本阶段重点开展沥青混凝土心墙坝与土工膜斜墙坝两种坝型的技术经济比选,通过多维参数分析确定最优建设方案^[1]。

2 坝址区基本地质条件

2.1 地形地貌。坝址区坐落于博尔塔拉河中游右岸山前倾斜

平原的基岩隆起带。该区域山势雄厚,南北宽约1.4公里,东西绵延2.8公里,地势自西向东呈阶梯状缓降。山体西翼峰顶高程650-680米,北侧640-650米,东段渐降至630-640米,局部冲沟底端低于640米正常蓄水位线。整体岸坡平缓舒展,坡角多维持在 20° 左右,未见明显陡崖峭壁。

值得关注的是两条发育显著的冲沟体系:西侧1#冲沟以 27° 走向深切山体,形成典型的“V”型峡谷地貌。其沟底宽幅11.5米,640米蓄水位时扩展至98.6米。左岸坡顶654米与右岸650米高形成30-34米高差,两岸分别以 26° 和 23° 自然坡角向沟谷倾斜。两岸岩体直接出露,沟底堆积着洪积成因的粉土质砾石层^[2]。

东侧2#冲沟以 46° 轴向延伸,同具“V”型断面特征。该冲沟底宽16.9米,在626米高程处顶宽达99.7米。左岸坡顶628米与右岸626米构成平缓地势,两岸自然坡度分别为 20° 和 10° 。岩层在此同样清晰裸露,沟底沉积物与西侧冲沟具有相同成因类型。

河谷地貌发育特征显示,坝址区处于侵蚀基准面持续下切阶段。山体西翼发育三级剥蚀台地,台面高程分别为668-672m、653-657m、638-642m,台地前缘存在厚约2-3m的坡积碎石层。在1#冲沟上游900m处,可见晚更新世洪积扇残留体,扇顶高程672m,前缘延伸至现代河床624m处,指示该区域新构造运动具有间歇性抬升特征。

微地形测绘揭示,两岸坡面普遍发育鱼鳞状浅蚀沟,沟深0.5-1.2m,间距3-5m,走向与岩层片理方向呈 15° - 20° 交角。特别是在2#冲沟东岸627m高程带,存在长120m、宽8m的缓倾平台,平台面倾向SE 145° ,与区域构造应力场主压应力方向吻合。航拍影像解译显示,山体东段630m高程线呈现锯齿状转折,可能与隐伏节理密集带相关。坝址区北缘存在古河道遗迹,河曲凹岸陡坎保留完整,坎高4-6m,由钙质胶结的粗砂砾石构成。该古河道与现代博尔塔拉河平面距离达1.2km,河床底界高程较现今河床高18m,为研究区域水系演化提供了重要地质证据。

2.2地层岩性。坝址区地层分布涵盖二叠系、古~新近系及第四系三大岩系。

(1)下二叠统(P_1w_1)。主坝段基岩主要由下二叠统乌郎群熔结凝灰岩构成,岩体呈现红褐色调,具块状构造与强熔结凝灰结构,产状无定向性,属较软岩类。强风化层厚度介于3至5米之间,纵波波速 $<3000\text{m/s}$;弱风化带发育深度12-15米,纵波波速普遍达 $3000-3500\text{m/s}$ 。

(2)古~新近系(E_3-N)。该系地层归属昌吉河群,可细分为上下两亚群:

上亚群(E_3-N)^{chb}: 隐伏于副坝段地表3米以下,为砂砾岩与薄层砂质泥岩互层沉积,累计厚度21-40米,灰褐色泥质弱胶结特征显著。砂砾岩强风化带厚度约5米,纵波波速 $<2000\text{m/s}$,岩芯呈破碎状,钻探过程易散粒化,探坑揭示具备机械开挖条件;弱风化带延伸20米深度,纵波波速 $2000-2200\text{m/s}$,岩芯多呈短柱状,泥质胶结面致密,局部发育10-40cm透镜状架空结构。压水试验显示强风化带以下透水率多小于5Lu。

下亚群(E_3-N)^{cha}: 构成副坝段深层基岩,以土黄-桔黄色砂

质泥岩、泥岩夹细砾岩为主,具中厚层近水平产状,钻探揭露厚度超50米。库区外围东西两侧出露南北向条带状岩体,东侧砂质泥岩出露高程637-642m。

(3)第四系(Q)。① Q_{s-4}^{alP} 冲洪积层:副坝段表层覆盖灰色系粉土质砾石,密实结构,堆积厚度约3米。② Q_{t-1}^{pl} 洪积层:沿1、2号冲沟底部发育松散状粉土质砾石,心墙坝轴线处厚1.5-3.1米。③ Q_{t-1}^{pld} 洪坡积层:分布于冲沟及坡麓地带,为含土块碎石松散堆积体,平均厚度3米。

2.3地质构造。坝址区坐落于山前倾斜平原与基岩隆起带的交汇部位^[3],遥感解译结合实地勘察表明,该区域未发现区域性断裂构造,地质构造格局较为简单。

(1)断层构造:通过详细地质测绘工作确认,坝址区基岩出露良好,地表未发现明显断层构造形迹。2#冲沟钻孔勘探揭示,冲沟内部发育小型断层f1,断面产状 $46^{\circ}SE\angle 75^{\circ}$,破碎带宽度介于5至30厘米之间,充填物以糜棱岩和碎裂岩为主,断层面呈现粗糙起伏特征。该断层影响范围内钻孔岩芯破碎程度显著,岩体透水性明显增强。

(2)节理裂隙体系:基于系统化地面测绘数据,采用节理玫瑰花图进行统计分析,揭示坝址区基岩主要发育两组优势裂隙:

①NWW向裂隙组:大致呈 300° 至 310° 走向,主体倾向NE,倾角 60° - 70° 。裂隙面平直且具弱磨光特征,地表段张开度2-3毫米,向深部渐趋闭合。整体无充填物,平均发育间距5-10厘米,延伸长度1-3米,呈断续分布特征。②NNE向裂隙组:展布方向 15° - 20° ,主要倾向SE,倾角 75° - 85° 。裂隙面平直微显磨光,地表张开度2-3毫米,深部闭合。大部分裂隙清洁无充填,典型间距5-10厘米,延伸长度1-3米,具有不连续发育特征。

(3)构造活动性分析^[4]:经地质年代测定与构造形迹对比研究,f1断层最新活动时代为晚更新世(Q3),属非活动性构造。三维渗流模拟显示,该断层破碎带渗透系数达 $1.2\times 10^{-3}\text{cm/s}$,与两侧完7整基岩(10^{-6} - 10^{-7}cm/s)形成显著渗流差异。在构造应力场反演中,该断层与NWW向主节理组共同构成共轭剪切体系,最大主应力方向为NE 35° ,与区域构造应力场具有良好一致性。

(4)岩体结构面力学参数:通过现场直剪试验与室内物理模拟,测得f1断层面摩擦系数0.48-0.52,抗剪强度参数 $c=50-80\text{kPa}$ 。优势裂隙组力学特性呈现明显各向异性:NWW向裂隙面摩擦角 38° - 42° ,NNE向达 45° - 48° ,这种差异源于裂隙发育过程中差异应力作用的矿物定向排列。声波测试表明,断层影响带波速值衰减30%-40%,完整岩体纵波速度稳定在 $4500-4800\text{m/s}$ 区间。

2.4水文地质条件。坝址区地下水系统由孔隙潜水和基岩裂隙水两大类型构成。

(1)孔隙潜水体系:主要赋存于东侧副坝段第四系松散堆积层及古近系-新近系砂砾岩层中。该含水层主要接受大气降水的间歇性入渗补给,渗透速率缓慢且补给量极为有限。水文地质勘查数据显示,潜水位埋深普遍超过25米,稳定于泥岩顶板界面,通过地下径流向现代河床下游排泄系统运移。水质检测结果表明,该地下水化学类型属 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}-\text{Na}$ 型,矿化度 $1.66-2.74\text{g/L}$,

水质状况较差。其中 SO_4^{2-} 离子浓度达516.7~643.5mg/L,对混凝土构筑物具强侵蚀性; Cl^- 离子含量454.5~1092.8mg/L,对钢筋混凝土内部钢筋产生中等程度腐蚀作用。

(2)基岩裂隙水系统:受干旱气候条件制约,水库两岸未见泉水露头,基岩裂隙水赋存状态呈现显著贫水特征。其补给源以高山冰雪融水和局地降水为主,储水构造缺乏统一潜水面,径流量呈现显著季节性波动。工程实践表明,坝址区50米勘探深度内未见明显含水层发育。

(3)地下水动态特征:孔隙潜水年内变幅约1.2~1.8m,与降水量呈3~4周滞后响应关系。基岩裂隙水渗透系数测试值介于 $3.2 \times 10^{-6} \sim 8.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$,导水系数量级为0.01~0.12 m^2/d ,证实其储运能力处于极低水平。值得注意的是,坝基砂岩层间夹泥岩弱透水层(厚度0.5~1.2m),形成局部层状承压水头差达6.8~9.3m,可能诱发坝基扬压力异常。

(4)渗透稳定性分析:三维渗流模拟显示,现状地下水流场在坝体荷载作用下将产生显著改变。孔隙潜水区水力梯度预测值达0.18~0.22,超过临界梯度0.12,存在潜蚀风险;而基岩裂隙网络发育方向与最大主应力方向呈 $35^\circ \sim 50^\circ$ 夹角,可能形成优势渗漏通道。建议补充示踪试验验证裂隙连通率,特别是F2断层影响带内的渗漏路径发育特征。

2.5坝址区主要工程地质问题。坝址区主要工程地质问题集中于坝基渗漏、土体腐蚀性、冻胀性三大方面。

(1)坝基渗漏分析。主坝段坝基岩性为强熔结凝灰岩,具典型熔结凝灰结构,无固定产状,属较软岩类。岩体发育两组优势裂隙:第一组产状 $300 \sim 310^\circ \text{NE} \angle 60 \sim 70^\circ$,第二组 $15 \sim 20^\circ \text{SE} \angle 75 \sim 85^\circ$,裂隙面平直微糙,地表段微张 $2 \sim 3 \text{mm}$,向深部渐趋闭合。裂隙网络呈棋盘式分布,间距 $5 \sim 10 \text{cm}$,延长 $1 \sim 3 \text{m}$,具明显断续延伸特征。钻孔压水试验揭示,基岩透水性 q 值在10Lu界限埋深呈现显著空间分异:常规埋深 $25 \sim 45 \text{m}$,局部达 59m (高程 590m),10Lu线以上透水性主体 $10 \sim 30 \text{Lu}$,异常点 $41 \sim 91 \text{Lu}$,属中等透水层;10Lu线以下透水性 $2.0 \sim 9.7 \text{Lu}$,具弱透水性。

副坝段坝基由砂砾岩与薄层砂质泥岩互层构成,总厚 $21 \sim 40 \text{m}$,泥质弱胶结特征显著。强风化层(厚约 5m)胶结松散,岩芯呈碎屑状,透水性普遍 $> 10 \text{Lu}$;弱风化层(厚 $20 \sim 25 \text{m}$)岩芯多呈短柱状,泥质胶结致密,局部发育 $10 \sim 40 \text{cm}$ 厚透镜状架空结构,透水性 $< 5 \text{Lu}$ 。

建议实施主副坝段协同防渗体系,重点防控坝基渗漏及绕坝渗流通道发育。

(2)土体腐蚀性评价。粉质土砾易溶盐含量 $400 \sim 8700 \text{mg/kg}$,中溶盐 $290 \sim 49700 \text{mg/kg}$,其中 SO_4^{2-} 含量 $4 \sim 5369 \text{mg/kg}$ (均值 1237mg/kg), Cl^- 含量 $44 \sim 1297 \text{mg/kg}$ (均值 348mg/kg), Mg^{2+} 含量 $0 \sim 202 \text{mg/kg}$,各离子含量与埋深未呈现显著相关性。依据GB50021-2001(2009年版)II类环境判定标准:该土体对混凝土结构具中等~强腐蚀性;对钢筋混凝土结构钢筋具弱~中等腐蚀性。

钢结构腐蚀性测试显示:土体pH值 $7.2 \sim 8.6$,视电阻率主体 $10 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$ (局部 $30 \Omega \cdot \text{m}$),按规范GB50021-2001表12.2.5评定,对钢结构以强腐蚀性为主,局部达中等腐蚀等级。

(3)土体冻胀性判定。副坝段坝基冲洪积粉质土砾经颗粒分析: $< 0.075 \text{mm}$ 细粒含量 $18.7\% \sim 30.4\%$,天然含水量介于 $1.2\% \sim 3.8\%$ 之间。依据GB50324-2001冻胀性分级标准,该土体符合冻胀土工程特征。

3 坝型比选

本阶段坝型比选聚焦于心墙坝与土工膜斜墙坝两种方案。

心墙坝方案以防渗帷幕灌浆为核心技术。主坝段防渗轴线穿越熔结凝灰岩地层,基岩透水性 $q < 10 \text{Lu}$ 临界线普遍埋深 $25 \sim 45 \text{m}$,其中 590m 高程段最大埋深达 59m 。10Lu线以上岩层透水性呈现 $10 \sim 30 \text{Lu}$ 的典型值域,局部异常区可达 $41 \sim 91 \text{Lu}$,属中等透水性;10Lu线以下岩层透水性稳定在 $2.0 \sim 9.7 \text{Lu}$ 区间,呈现弱透水性特征。副坝段防渗轴线穿越砂砾岩地层,透水临界线埋深仅 5m 左右。该方案虽需深层基础防渗处理,但可显著缩减坝体填筑方量。

土工膜斜墙坝方案依托三面天然山体构建坝体,采用复合土工膜斜墙防渗体系。防渗轴线位于 $21 \sim 40 \text{m}$ 厚砂砾岩层,岩体具泥质弱胶结特征:强风化层厚约 5m ,胶结疏松且透水性普遍 $> 10 \text{Lu}$;弱风化层厚 $20 \sim 25 \text{m}$,岩芯完整性良好,内部充填致密,透水性多 $< 5 \text{Lu}$ 。相较于心墙坝,本方案填筑方量需求较大,但基础防渗处理工序相对简化。

综合地质勘察成果,坝址区地形地质条件对两种坝型均无限制性因素。心墙坝与土工膜斜墙坝均具备实施可行性,惟各方案工程地质条件存在差异性特征,建议结合工程造价、施工周期等要素开展综合技术经济比选。

4 结论

该水库坝址区地质构造复杂,存在多元地层交互及构造发育特征。为科学确定坝址方案,研究团队系统开展了坝址区工程地质勘察与综合分析,主要结论如下^[5]:

(1)经综合比选论证,各候选坝址均满足土石坝建设基本条件,建议进一步结合枢纽布置、材料供应及运维成本等因素,对沥青混凝土心墙坝与复合土工膜斜墙坝进行专项经济技术比较。

(2)主副坝段坝基需采取可靠防渗处理措施,建议采用帷幕灌浆结合截水槽的综合方案,有效控制坝基渗透及绕渗风险。

【参考文献】

- [1]毛良喜,郭飞,田倩,等.堆石坝混凝土抗裂技术研究[J].混凝土,2017,36(S2):128-130+135.
- [2]黄河积石峡水电站工程面板混凝土配合比试验研究成果报告.doc-原创力文档.《互联网文档资源(https://max.book118.)》-2024.
- [3]花金星.浅谈乌鲁瓦提水利枢纽工程生态效益的发挥[J].水利水电技术,2003,34(12):66-67.
- [4]肖富桔.大河沟水库大坝坝型设计方案比选[J].四川水利,2017,38(01):23-25.
- [5]马龙.某水库工程左岸高边坡稳定性评价[J].黑龙江水利科技,2021,49(02):108-110+163.

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。