

猴子岩水电站坝址不良地质条件与坝型方案论证

陈春文¹, 何万通²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;

2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘要:水电工程界在深厚覆盖层上建坝方面积累了丰富的经验,这些经验一方面对于指导地质条件类似地区大坝建设具有重要意义,但另一方面还应结合场区不良地质条件进行细致比选。猴子岩电站在可研设计初期,曾考虑借鉴下瀑瀑布沟的经验选用最大坝高155 m的碎石土心墙坝,随着勘察设计工作的深入,最终选择面板堆石坝并取得良好工程效益。

关键词:坝型选择;深厚覆盖层;粘质粉土层;面板堆石坝;不良坝址条件

中图分类号: [TM622];TV641.4;P624

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2018)05-0082-04

0 引言

水利水电建设中,坝型选择至关重要。坝型选择合理,则造价低、建坝速度快、质量好;坝型选择不当,则造价高,建坝工期长,质量次,甚至被迫停工修补,损失巨大。对水利水电工程坝型的选择,通常提出几个可行性坝型,通过对相关影响因素分析,凭地质条件适宜性,工程造价的大小,或施工条件的好坏等进行坝型选择。

一般而言,水利水电工程坝型比选涉及因素包括:库区地形条件、地质条件、枢纽布置方案、抗震因素、导流方案、施工技术、施工干扰度、施工工期、工程造价、水利生态环境、材料价格及材料运输费用、料场的选择利用及开采程度、防洪度汛、运行管理及日后维修维护费用等^[2],可谓涉及面广,影响因素多。而当前我国大型水电工程坝型主要在混凝土或碾压混凝土重力坝及拱坝、土心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝等中进行比选。以位于西南山区的大渡河上所建电站为例,双江口水电站主要对土质心墙堆石坝与拱坝进行了比选并最终选择心墙堆石坝,大岗山水电站主要对拱坝及混凝土面板堆石坝两种坝型进行了比选并最终选择拱坝,长河坝水电站则比选了砾石土心墙堆石坝、砾石土斜心墙堆石坝和沥青混凝土心墙堆石坝三种当地材料坝,并最终选定为砾石土直心墙堆石坝。而本文的研究对象,同样建于大渡河之上的猴子岩水电站则主要对混凝土面板堆石坝、土质心墙堆石坝及拱坝进行了比选,并最终

选定为混凝土面板堆石坝。

1 坝区地质的基本特性

猴子岩水电站坝址区河谷狭窄,呈对称的“V”型。枯水期河水位1 694 m~1 697 m,河面宽约65 m;正常蓄水位1 842 m时,相应河面宽350 m~380 m。两岸地形陡峻,临河坡高大于800 m,呈上缓下陡。左岸1 900 m高程以下坡度一般60°~65°,以上缓至30°~40°;右岸2 000 m高程以下坡度一般55°~60°,以上缓至40°~50°。出露地层主要为志留系上统的钙质绢云石英片岩、泥质白云岩,以及泥盆系下统的变质碳酸盐岩。坝址区第四系沉积物以河床冲洪积为主,崩坡积和支沟洪积次之,此外还发育堰塞湖相堆积与冰水堆积,构成一般厚度达41.2 m~67.8 m,最大厚度75.2 m的河床深厚覆盖层。

坝址区地层经多次构造变动,岩石发生不同程度区域变质,层理、片理及层间褶皱较发育,地层总体产状由N40°~60°E/NW∠30°~45°逐渐转向为N80°E/NW∠30°~45°,局部产状变化较大。坝址区发育SE向延伸的区域断裂F0,出露于左岸坝线上游,主断带宽15.5 m,构造岩主要为碎粒岩——碎粉岩;二级结构面F8-2,分布于左岸坝线上游斜坡处,断层宽约5 m,NNW向延伸,构造岩为碎粒岩——碎粉岩;以及一些次级小断层、层间挤压破碎带及节理裂隙等。工程场地不具备发生强震及中强震的地质构造条件,地震危险性主要来自外围强震活动的影响波及。根据工程场地地震安全性评价结果,猴子岩水电站工

收稿日期:2018-07-31

程场地 50 年超越概率 10% 基岩水平峰值加速度为 141 gal, 相应的地震基本烈度为Ⅶ度, 100 年超越概率 2% 基岩场地水平峰值加速度为 297 gal, 区域构造稳定性差。

2 不良地质条件分析

上述坝址地质条件是坝型选择的基本因素, 而不良地质现象及主要工程地质问题是坝型成立的决定性因素, 两者结合起来的综合因素构成建坝基本条件。猴子岩坝区制约坝型比选的不良地质条件主要包括河床深厚覆盖层、坝前右岸潜在活动性泥石流沟、坝后左岸巨型冰水堆积体等方面。

2.1 河床深厚覆盖层

坝址河床覆盖层最大厚度为 75.2 m, 多层结构, 中上部、下部主要为砂砾石层, 中部夹一最厚可达 29.5 m 的粘质粉土层, 作为坝基将存在不均匀变形、渗透稳定和砂层地震液化等问题。由于第②层(见图 1)粘质粉土层是覆盖层中工程地质性状最差的部分, 该土层中 0.075 mm ~ 0.005 mm 粒径组的粉粒含量一般为 56.0% ~ 72.4%,

小于 0.005 mm 粒径的粘粒含量一般为 14.2% ~ 21.0%, 含水率一般为 16.2% ~ 26.0%, 平均孔隙比 0.623, 属密实土。经标贯试验得到其承载力标准值 f_k 为 160 kPa ~ 170 kPa, 经三轴剪切试验得到其内摩擦角为 22.0° ~ 28.2°, 凝聚力为 0.01 MPa ~ 0.04 MPa。室内压缩试验所得的压缩系数值 α_{1-2} 为 0.137 MPa⁻¹ ~ 0.308 MPa⁻¹, 属中压缩性土。室内渗透变形试验测得其渗透系数 1.40×10^{-6} cm/s ~ 2.33×10^{-5} cm/s, 微透水。根据上述试验结果判别, 该层承载、抗变形及抗剪强度均不高, 存在不均匀沉降和抗滑稳定问题。根据振动液化判别规定, 该层为可能液化层, 因其渗透系数较低, 在施工期和地震情况下, 产生的超孔隙水压力不能及时排除, 将引起土层抗剪强度剧烈降低产生剪切变形, 不可直接作为坝基。此外, 就颗粒较粗、孤石多、局部架空明显、渗透性强的其他三个砂砾石层而言, 其抗渗透破坏能力也较低, 存在接触冲刷和管涌破坏。

我国在深厚覆盖层上建坝的工程实践很多,

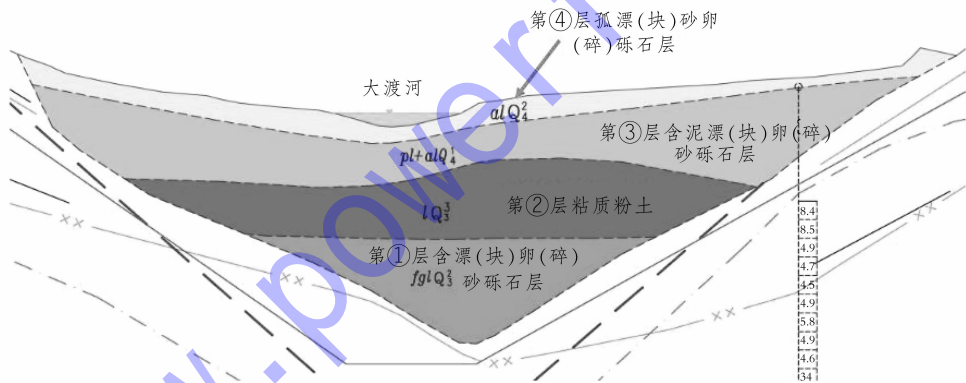


图 1 猴子岩河床覆盖层层次结构

对于覆盖层坝基处理积累了丰富的工程经验, 主要措施包括挖除, 部分挖除加灌浆, 振冲加固等。例如同为大渡河上, 建基于最大厚度 78 m 覆盖层上的瀑布沟电站, 采取了开挖与灌浆处理等措施; 建基于最大厚度 79 m 覆盖层上, 坝高达 240 m 的长河坝电站, 对覆盖层采取了挖除砂层保留大部分覆盖层的处理方案; 田湾河上的仁宗海堆石坝针对覆盖层表层深度 20 m 的淤泥质壤土层, 原设计采取全部挖除方案, 在工程实践阶段改为振冲碎石桩进行了加固处理, 取得良好效果。因此, 针对猴子岩坝址的深厚覆盖层问题, 在后期坝型选择的同时配合特定坝型要求进行工程处理即可。

2.2 坝前右岸潜在活动性泥石流沟

坝前右岸发育磨子沟, 沟口距坝轴线约 700 m, 沟口高程 1 712 m, 主沟长约 14 km, 发源于高山冰斗海子, 流域面积约 19.4 km²。磨子沟出口较窄, 沟内宽敞, 平面形态呈“喇叭”形, 谷底为斜坡地貌, 总体坡度约 21°。从沟谷形态、沟内堆积物特性及物质组成来看, 磨子沟为一典型的冰川谷, 堆积物以冰碛物为主。高程 2 370 m 上发育 U 形沟谷底缓平台, 磨子沟村坐落其上。该平台以下沟段内堆积物丰富, 钻孔揭示最厚堆积达 93.4 m。堆积物以含块碎石土为主, 颗分试验结果表明, 碎、砾石含量较高, 可占 95%, 块碎石原

岩主要为大理岩。

磨子沟两侧坡均为稳定性良好的岩质坡,没有发生大规模滑坡、垮塌等不良地质现象的可能,为发生泥石流提供大量较新松散物源可能性小,泥石流的主要物源来自暴雨期坡面片流对现代小冲沟两侧沟壁松散物质的掏刷。综合分析磨子沟的沟谷形态、堆积物发育分布、沟谷水力特征、流域植被发育、不良地质现象、可启动物质等多方面因素,认为磨子沟现今不存在发生大规模泥石流的可能,仅2370 m高程以下沟段在汛期特大暴雨条件下有发生小规模稀性泥石流的可能。按不同年度频率的暴雨洪水峰值流量进行计算预测,磨子沟在20年一遇、50年一遇、100年一遇和200年一遇的暴雨条件下,泥石流的堆积长度约为148.5 m、170.0 m、201.5 m和225.4 m,堆积方量分别为32354.3 m³、48631.4 m³、80885.7 m³和113240.0 m³。此外,水库正常蓄水后,沟内堆积物前缘被水淹没,可形成库岸塌岸。由于泥石流沟距离坝址较近,在坝型选择过程中,应考虑泥石流和塌岸的可能,并结合上游围堰布置,尽量避免坝前固体物质运动对大坝基坑施工及大坝运行安全产生影响。

2.3 坝后左岸巨型冰水堆积体

坝后左岸分布有泥洛堆积体和角坝堆积体,规模较大。泥洛堆积体位于泥洛村附近岸坡,分布高程1700 m~2500 m,后部呈明显的冰斗地形。堆积体前缘顺河向宽度480 m~530 m,后缘宽度约400 m,堆积厚度大,一般为50 m~80 m,体积约5800万m³。其上游侧以陡坡前缘一条浅缓冲沟为界,下游侧以泥洛沟为界,沟谷深切,深达50 m~100 m。堆积物主要为含块碎砾石土层,结构密实,渗透性较差,降雨汇水大部分沿冲沟排泄入河,入渗有限,坡体物质较干燥,边坡未见变形破坏迹象,总体上为一古老的冰水堆积,现状整体稳定。根据坝址枢纽建筑布置构想,泥洛堆积体可能位于左岸泄洪消能的雾化区范围,计算分析泄洪雨雾对堆积体边坡的影响,得到边坡处于极限稳定状态。角坝堆积体紧邻泥洛沟下游边界,主体倾向泥洛沟,后缘高程2420 m,前缘高程1740 m,地形坡度30°~35°。纵向长1600 m,横向宽480 m,平面堆积较大,一般厚度14 m~25 m,体积约1000万m³。堆积体成因为冰水积,堆

积物与泥洛堆积体基本相同,为灰黄色含块碎砾石土层,结构密实,边坡未见变形破坏迹象,现状整体稳定。同样对其进行泄洪雨雾工况稳定性计算,得到边坡处于稳定状态。

泥洛堆积体和角坝堆积体在天然条件下处于整体稳定状态,在泄洪雨雾工况下也处于稳定~极限稳定状态,但安全裕度不大。泄水过程的长期雾化,会对之稳定性产生影响。因此,在坝型选择过程中,一是考虑雾化区尽量避开堆积体,减少泄洪雨雾对堆积体边坡稳定的弱化,例如拱坝的坝身泄水便可拉开与堆积体的距离;二是与特定坝型配套的泄洪建筑布置将受到堆积体的制约,鉴于其散体结构,地下洞室不易穿过堆积物内部,地表泄洪也不宜布置于坡体之上。

3 可选坝型方案比选

针对猴子岩坝址区的地质条件,主要有面板堆石坝、砾石土心墙堆石坝和混凝土双曲拱坝三种坝型较为合适。三种坝型对建坝地质条件的要求是不同的,对面板堆石坝而言,建坝条件主要研究两方面的因素:一是趾板岩体的强度、渗透、稳定性,二是坝基岩体的强度、变形、抗滑及渗透稳定。由于西南地区地形地质条件复杂,交通运输困难,缺乏防渗土料等因素,混凝土面板堆石坝常是最为经济的选择。心墙堆石坝对坝基要求相对不高,其关键问题主要是土心墙料的强度和抗渗流稳定等问题。因其适应地基变形能力强,施工方法选择灵活,筑坝材料就地取材,在大坝填筑量不到总工程量的50%时第一批机组可在低水头下投放运行等特点,高心墙堆石坝得以广泛采用,在建的双江口心墙堆石坝坝高将达320 m,已建的糯扎渡心墙堆石坝最大坝高也达到了261.5 m。拱坝除对地形有较严格要求外,建坝条件主要研究三方面:一是坝基岩体的强度和变形特性,二是坝基和坝肩岩体的抗滑稳定性,三是坝基岩体的渗透稳定性。混凝土拱坝在改善结构应力分配、节省混凝土材料上有非常明显的优点,在我国得到广泛应用,特别是高坝水库中应用比例较高。

对猴子岩电站坝址区前述主要工程地质问题做可靠处理后,均具备修建面板堆石坝、砾石土心墙堆石坝和拱坝的条件,各方案的工程考虑如下:

(1) 面板堆石坝方案趾板区将挖除河床覆盖层,基础置于基岩上,坝壳亦将挖除覆盖层第②层

粘质粉土及以上层。相对心墙堆石坝,设计坝坡较陡,基坑开口线距磨子沟较远,约126 m,可避免磨子沟泥石流问题,但存在深基坑稳定和涌水问题。针对坝后左岸泥洛堆积体稳定问题,因无法将泄洪洞室置于堆积体内部,亦不宜在堆积体坡表设置开敞式溢洪道,将泄洪出口置于堆积体上游,对堆积体采取上部减载、前缘支挡、雾化区护坡封闭及排水等处理措施。

(2)砾石土心墙堆石坝方案心墙区亦将挖除河床覆盖层,坝壳置于较密实的河床第①层含漂(块)卵(碎)砂砾石层上。鉴于设计坝坡较面板堆石坝缓,基坑开口线距磨子沟较近,约60 m,同时存在深基坑稳定和涌水问题。若对心墙堆石坝河床覆盖层采取振冲方案,可避免深基坑稳定问题和磨子沟泥石流的影响。但因河床第②层粘质粉土层埋深及厚度较大,性状差,分布广,处理难度较大。由于坝址区河谷狭窄,机械设备的容纳空间极小,道路修筑条件差,采取振冲方案施工进度慢,将严重耽误工期。砾石土心墙堆石坝方案存在的较大问题是,心墙土料需要从下游13 km外的土料场运取,需征用土地600余亩,土料的开采运输对当地环境影响较大。相对而言,面板堆石坝方案可减少填筑400万 m^3 ,且无需征用土料场。

(3)拱坝方案坝基需全部挖除河床覆盖层,基坑范围相对较小,上游围堰置于磨子沟口下游,基本避开泥石流的影响。大坝距下游泥洛堆积体相对较远,并可充分利用坝身泄洪,减轻对泥洛堆积体冲刷及雾化边坡稳定的影响。但存在拱肩槽、坝顶以上缆机平台等高边坡和河床深基坑稳定问题,且鉴于岩体透水率 $q \leq 1 \text{ Lu}$ 相对抗水层埋深大,坝基防渗工程量较大。由于拱坝方案对勘察深度的要求远高于堆石坝方案,为满足拱坝设计需要,将补充许多勘察工作,工期相应面板堆石坝方案延长一年,同时将增加工程静态投资和动态投资。相对而言,面板堆石坝方案具有工期短、投资省、收益早的明显优点。

4 面板堆石坝方案的实施

可研阶段坝型选择报告的最终审查中,确定将混凝土面板堆石坝作为猴子岩电站的坝型方案,最大坝高223.5 m,枢纽建筑物主要由拦河坝、两岸泄洪及放空建筑物、右岸地下引水发电系

统等组成。大坝主要由趾板(6 m宽趾板+防渗板)、面板及其接缝止水系统、大坝填筑体、坝顶防浪墙等组成。大坝上游设置铺盖,下游坝脚设置压重体。大坝填筑体870万 m^3 ,上游铺盖66万 m^3 ,下游压重体56万 m^3 ,总填筑工程量992万 m^3 ,混凝土面板面积5.95万 m^2 ,接缝总长7650 m。对于坝基的处理方案如下:趾板至坝轴线附近河床开挖至基岩,其中趾板、防渗板部位开挖至新鲜或弱风化岩。碾压混凝土围堰至其上游150 m范围内的河床开挖至基岩,坝体中部河床保留,清除表面淤泥、污物,砂卵覆盖石层强夯。两岸坝坡按设计要求进行植被及覆盖层清理,对局部坡度较陡或反坡位置进行削坡或用浆砌石补坡至设计坡比。最后对粘质粉土层进行了开挖处理,采取平面分区、立体分层施工方法,通过在左侧岸边深挖先导槽,形成左岸排水深沟,引导、排除基坑渗水,使粘质粉土得以固结,再辅以砂砾料置换和分层开挖方式。最终于2013年4月中旬完成大坝基坑开挖,比计划工期提前40天^[3]。

经过业主单位的精心筹划、参建各方的细致工作以及咨询审查专家的跟踪把关,猴子岩电站首台机组于2016年底顺利并网发电,充分证明猴子岩面板堆石坝的坝型方案选择是成功的。

5 结语

水利水电工程建设中的坝型选择问题因其涉及因素众多,建成之后的技术与经济性评价不易,历来争议较多,因此,在坝型选择阶段就应抓住关键,全面权衡,作出科学决策。通过猴子岩电站预可研、可研、坝型比选及施工阶段工作的参与,对深厚覆盖层上高坝大库坝型方案的选择得出以年结论:

(1)水电工程界在深厚覆盖层上建坝方面积累了丰富的经验,这些经验一方面对于指导地质条件类似地区大坝建设具有重要意义,但另一方面还应结合场区不良地质条件进行细致比选。猴子岩电站在可研设计初期,曾考虑借鉴下游瀑布沟的经验选用最大坝高155 m的碎石土心墙坝,随着勘察设计工作的深入,最终选择面板堆石坝并取得良好工程效益。

(2)坝基部位厚度较大、强度和承载力较低的粘质粉土层,容易出现局部剪切破坏甚至整体

(下转第95页)

达 117.50 m,基础混凝土防渗墙深达 80 m,在国内外同类项目中极为罕见。设计过程中通过对围堰基础不同防渗深度下围堰渗流稳定分析及围堰建成后大坝基坑开挖过程中不同阶段围堰渗流稳定分析,选择安全合理的堰型及堰基防渗型式,为工程顺利完工创造了有利条件;在猴子岩水电站工程建设中,2011 年汛前填筑分流围堰,设计将上下游围堰与上下游分流围堰结合布置,为汛后及早进行上、下游围堰超深防渗墙施工创造了有利条件。

参考文献:

(上接第 73 页)

混凝土供应的准确性和供应效率。

(2)利用 Sql Server2000 数据库开发技术,实现了数以千种的混凝土配比数据的综合查询、远程访问、分布式存取、备份和处理。

(3)通过 LED 屏幕显示、语音播放及硬盘录像机功能,扩展了车辆智能调度系统的交互能力,有效提高了车辆司机、拌和楼控制系统以及调度室调度人员之间的协调性,从而提高了混凝土生产供应环节质量的可靠性,使拌和系统的运行真正实现生产管理自动化。

3.3.3 应用成效

猴子岩工程混凝土生产智能调度系统实现了混凝土高峰供应强度达到设计供应能力的 109.4%,保证了供应环节的高效、准确、有序,同时保证了混凝土供应质量和混凝土浇筑进度。

4 结 语

猴子岩水电站首台 4#机组已于 2017 年 1 月

(上接第 85 页)

滑动的危险。修建大坝时需采取措施提高地基强度,以降低软土的压缩性,减少坝体变形及不均匀沉降,防止坝体产生裂缝。处理办法最好是挖除软弱地基,也可采取换砂、压重或砂井法,同时控制填土速率,还可采用振冲碎石桩或强夯等加固方法。

(3)我国面板堆石坝建坝数量多,当前正朝着 300 m 级高面板堆石坝、高寒地区面板堆石坝、高地震烈度区面板堆石坝建设发展,无论坝高、填筑规模还是技术难度都处于世界前列。而关于深厚覆盖层上面板堆石坝渗漏量监测、高水头下堆

[1] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川大学. 大渡河猴子岩水电站围堰和大坝基础边坡渗流、稳定及应力变形计算分析[R],成都,2009.

[2] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司. 四川省大渡河猴子岩水电站可研施工组织设计报告[R],成都,2009.

作者简介:

梁 娟(1981-),女,四川南部人,高级工程师,学士,从事水电工程施工组织设计工作;

张有山(1973-),男,河南南阳人,教授级高级工程师,学士,从事水电工程施工组织设计工作;

王小波(1983-),男,江苏海安人,高级工程师,学士,从事水电工程施工组织设计工作。 (责任编辑:卓政昌)

投产发电,末台 1#机组已于 2017 年 11 月完成 72h 试运行,目前枢纽建筑物已完建,并经过 2017 年一个完整蓄水期检验,各枢纽建筑物运行正常。下一步,猴子岩公司将在大渡河公司智慧企业组织架构下,在电站反恐设计、水库调度、检修等方面,把猴子岩水电站向智慧电厂纵深推进,真正实现设备智能巡检、故障精准排查、系统协同联动的目标。

参考文献:

[1] 涂扬举. 建设智慧企业,实现自动管理[J]. 清华管理评论,2016(10):29-37.

[2] 涂扬举. 智慧企业关键理论问题的思考与研究[J]. 企业管理,2017(11):107-110.

[3] 涂扬举. 数据驱动智慧企业[J]. 企业管理,2018(2):100-103.

作者简介:

郑正勤(1970-),男,福建尤溪人,国电大渡河猴子岩水电建设有限公司总经理,高级经济师,主要从事水电工程建设管理工作。 (责任编辑:卓政昌)

石料力学特性、渗透特性及长期变形特性试验等方面仍是技术难题,还应加强研究。

参考文献:

[1] 张光斗. 1998. 法国马尔帕塞拱坝失事的启示[J]. 水力发电学报,(4):96-98.

[2] 陈志强. 2003. 水利枢纽工程坝型优选模型及其应用研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学.

[3] 黄浩,杨正贵,丁国泰. 2014. 猴子岩水电站大坝深窄基坑开挖施工技术[J]. 水电与新能源,(3):8-10.

作者简介:

陈春文(1966-),男,重庆长寿人,教授级高级工程师,主要从事水电工程地质勘察工作;

何万通(1989-),男,江西上饶人,博士,主要从事水电工程地质勘察工作。 (责任编辑:卓政昌)