

远安抽水蓄能电站上水库坝型及防渗形式联合比选

李 峥 祥

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘 要:笔者以远安抽水蓄能电站上水库为例,将坝型和全库盆防渗形式联合比选。从大坝、库岸和库底三个方面协调考虑,笔者重点对三个组合方案进行了比较研究。通过地形地质条件、施工条件、工程技术难度、方案经济性综合比较,拟定了“混凝土面板堆石坝+库周钢筋混凝土面板+库底土工膜”组合方案,笔者的研究思路及研究成果可为其他全库盆防渗及坝型设计提供参考。

关键词:抽水蓄能电站;全库盆防渗;坝型选择;上水库

中图分类号:TV743;TV331

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)增 2-0139-06

Combined Comparison and Selection of Dam Type and Anti-seepage Form of Upper Reservoir of Yuan'an Pumped Storage Power Station

LI Zhengxiang

(PowerChina Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha Hunan 410014)

Abstract: Taking the upper reservoir of Yuan'an Pumped Storage Power Station as an example, this paper compares and selects the dam type and anti-seepage form for whole reservoir basin. Considering coordination from the three aspects of the dam, reservoir bank and reservoir bottom, the author focuses on a comparative study of the three combination schemes. Through the comprehensive comparison of topographic and geological conditions, construction conditions, engineering technical difficulties and program economics, the combined scheme of "concrete-faced rockfill dam + reinforced concrete panel around reservoir + geomembrane at the bottom" of the reservoir bottom is proposed. The research ideas and results can provide reference for other seepage prevention of whole reservoir basin and dam type design.

Key words: Pumped storage power station; Seepage prevention for whole reservoir basin; Dam type selection; Upper reservoir

0 引 言

挡水建筑物型式与库盆防渗相互影响,每个工程具体条件的不同,相互影响的程度也不同,当大坝防渗系统位于上游面时,库盆采用表面防渗;当大坝防渗系统位于坝轴线时,库盆采用垂直防渗^[1]。远安抽蓄上水库地质条件较差,上水库存在水平渗漏和垂直渗漏,宜采用全库盆防渗型式。全库盆防渗需要将坝体防渗与库盆防渗相互连接,构成封闭的防渗体系,是工程设计阶段需要关注的重大技术问题^[2]。

1 远安抽蓄上水库概述

远安抽水蓄能电站上水库位于远安宝华寺村敬家沟,地形呈“圈椅”状,为北东东向冲沟,溪沟较陡。库盆周边地形较整齐,冲沟较少发育,无低

于正常蓄水位的垭口,地形封闭条件较好,库周地形分水岭宽厚。上水库为灰岩分布区,库区岩溶发育较强烈,地下水位埋藏较深,坝址左、右岸地下水位埋深分别为 69.1~90.3 m、69.1~83.7 m。钻孔压水试验过程中渗漏量较大,整体未进入透水率 $q < 1$ Lu 的相对不透水层。

坝址集水面积为 0.82 km²,多年平均径流量为 33.66 万 m³,正常蓄水位 847.00 m,相应库容 720.00 万 m³,死水位 812.00 m,死库容为 71.00 万 m³,调节库容 649.00 万 m³,最大消落深度 35.00 m。枢纽主要挡水建筑物为 1 座大坝,大坝为混凝土面板堆石坝,坝顶高程 852.00 m,坝顶宽度 9.00 m,最大坝高 110.00 m,坝顶轴线长 440.00 m。大坝上、下游坝坡均为 1:1.4。上水库校核洪峰流量($P=0.1\%$)81.2 m³/s,集水面

收稿日期:2023-05-23

积及洪峰流量较小,无需设置泄水建筑物^[3]。

2 上水库坝型及防渗形式选择

2.1 坝型比选思路

根据坝址区地形地质及料源条件,结合工程特点综合分析,对上水库大坝坝型进行初步分析比选。

(1)重力坝与当地材料坝比选。坝址区地层岩性主要为栖霞组中厚层灰岩,岩石强度较高,满足百米级重力坝和当地材料坝建坝条件。工程区石料丰富,质量和储量均满足筑坝要求。鉴于坝址区地形呈宽缓“V”型沟谷,大坝坝轴线长约440 m,最大坝高110 m,重力坝坝型坝体混凝土工程量大,工程投资大;上水库库区地层岩性为可溶岩,需采用全库盆防渗,库盆总开挖量约594.5万 m^3 ,开挖工程量大,重力坝坝型工程弃渣量大;另外,上水库集水面积小,无需布置泄水建筑物,重力坝坝型无法发挥坝身泄洪优势,明显不经济。因此,重力坝方案不予考虑。

(2)面板堆石坝与心墙堆石坝比选。为充分利用开挖料源,减少弃渣对生态环境破坏,宜修建当地材料坝,主要考虑面板堆石坝和心墙堆石坝等坝型。上水库库周石料丰富,下水库库区内分布大量可满足工程需求的土料,两种坝型均不存在稳定、安全运行和料源等制约因素。上水库采用全库盆水平防渗型式,坝体防渗宜采用表面防渗型式,以利于与库周面板防渗平顺衔接,故不宜采用心墙堆石坝坝型。抽水蓄能电站水位消落深度较大,面板堆石坝坝型能很好地适应其水位骤降特点。另外,大坝表面防渗面板易与库周防渗面板平顺相接可形成联合防渗体,大坝坝体填筑料能充分利用上水库扩库开挖料,减少工程弃渣。经分析,采用面板堆石坝作为上水库大坝代表坝型,结合库盆防渗型式对钢筋混凝土面板堆石坝和沥青混凝土面板堆石坝两种坝型进行详细比选。

2.2 防渗型式比选思路

上水库坝址集水面积0.82 km^2 ,多年平均径流量37.8万 m^3 ,天然径流补给少,水量损失等于电量损失,防渗要求高。根据坝址区地形地质条件、水文地质条件及施工组织设计,结合枢纽布置及工程特点综合分析,对上水库库盆防渗型式进行分析比选。

(1)垂直帷幕防渗与全库盆防渗比较。上水

库坝址区地层岩性主要为碳酸盐地层,为可溶岩,岩溶发育强烈。库区地下水主要是岩溶裂隙水,坝址左岸地下水位埋深达90.75 m(高程790.98 m),坝址右岸地下水位埋深大于81.60 m,库周水位均低于水库设计正常蓄水位,坝址两岸未见相对不透水层($q \leq 1.0 \text{ Lu}$),水库渗漏问题突出。坝后发育的隔水层梁山组砂岩分布高程仅为725.00 m左右,岩层缓倾,倾向南西,利用该层做垂直防渗的可能性不大;另外,垂直帷幕防渗方案工程量大,实施难度大,防渗可靠性差,且难以彻底解决上水库渗漏问题^[4]。考虑到抽水蓄能电站对上水库防渗要求较高,全库盆防渗方案较防渗帷幕方案可靠性高,又可兼顾库岸防护,采用全库盆防渗方案作为代表防渗型式。

(2)库岸混凝土面板防渗材料与土工膜防渗材料比较。上水库大坝坝型初选为面板堆石坝,为减少施工设备投资和施工干扰,大坝与库岸宜采用同一种防渗结构^[5];同时,库岸处于水位变幅区,从防渗材料耐久性及工程安全性考虑,暂不考虑土工膜柔性材料防渗,拟定钢筋混凝土面板与沥青混凝土面板两种防渗材料进行库岸防渗型式比较。

(3)库底刚性防渗材料与柔性防渗材料比较。库底回填区采用石渣回填,不均匀沉降大,蓄水后容易存在变形不协调等问题。库底采用钢筋混凝土面板防渗对变形的适应性差。为适应库底后期不均匀沉降变形,库底防渗宜采用柔性防渗型式,主要可选择土工膜、沥青混凝土面板、黏土三种柔性防渗材料进行库底防渗型式比较。虽然下水库库区分布有大量土料,但土料主要为崩坡积土和冲洪积土,土体属强~中等和中等透水料,不适合作为库底防渗材料,故库底黏土防渗型式不参与本次比选。

2.3 上水库坝型及防渗型式拟定

对大坝、库岸、库底表面防渗型式进行组合比选综合上述分析,拟定钢筋混凝土面板坝和沥青混凝土面板坝两种坝型,库岸钢筋混凝土面板与沥青混凝土面板两种刚性防渗材料,库底土工膜、沥青混凝土面板两种柔性防渗材料的防渗型式比较,各比选方案库底防渗层顶高程均为807.00 m。上水库坝型及库盆防渗型式拟定组合比选方案如下:

方案 1: 钢筋混凝土面板堆石坝+库岸钢筋混凝土面板+库底土工膜;

方案 2: 全库盆沥青混凝土面板防渗方案;

方案 3: 沥青混凝土面板堆石坝+库岸沥青混凝土面板+库底土工膜;

方案 4: 钢筋混凝土面板堆石坝+库岸钢筋混凝土面板+库底沥青混凝土面板。

防渗组合方案 4 采用两种不同的防渗结构组合,需两种施工设备和工艺,增加施工费用且施工干扰大,此方案不参与比选,主要对方案 1、方案 2、方案 3 进行比选。

3 各方案设置

3.1 方案 1

(1) 大坝布置。大坝采用钢筋混凝土面板堆石坝,坝顶高程 852.00 m,坝顶宽度 9.00 m,最大坝高 110.00 m(坝轴线处),坝顶轴线长 440.00 m,坝顶设 L 型防浪墙,上游墙高 4.0 m,下游墙高 3.0 m,坝顶上、下游设景观栏杆,拟定大坝上下游坝坡均为 1:1.4。下游面沿高程每隔 25.0 m 设一级马道,马道宽 3.0 m。

坝体堆石料分区从上游至下游依次为垫层区、特殊垫层区、过渡区、上游堆石区、下游堆石区、下游网格梁+植草护坡。垫层区及过渡区坡比均为 1:1.4,其水平宽度为别为 3.0 m 和 4.0 m。过渡料下游为主堆石区,上游坡比 1:1.4,为提高填筑石料的利用率,在主堆石区下游设置下游堆石区,上游坡比为 1:0.25,下游坡比为 1:1.4,在坝体高程 800.15~776.00 m 设置增模区,下游堆石区高程 776.00 m 以下设主堆石区。大坝下游面高程 841.00 m 以上设置厚度为 1 m 的浆砌块石护坡。

大坝采用 C30 钢筋混凝土面板防渗,面板等厚 0.40 m。为与回填死库容相适应,在大坝上游堆石体上设置连接板与库底土工膜防渗层连接,连接板水平投影宽 5.00 m,厚 0.60 m。连接板混凝土强度等级 C30,其下部设特殊垫层料厚 0.3 m,垫层料厚 2.0 m,过渡层料厚 2.5 m。面板与连接板连接处设周边缝,与库底防渗结构组成封闭防渗体系。

(2) 库岸钢筋混凝土面板防渗。利用天然地形按 1:1.4 修坡形成挡水库岸,采用钢筋混凝土面板防渗,面板等厚 0.40 m。面板在库底周边与排水观测廊道采用周边缝连接,与库底防渗结构组成封闭防渗体系。面板底部设 0.35 m 厚无砂混凝土排水层,库底周边设排水观测廊道,与岸坡、库底防渗体系形成排水系统,并通过排水洞将渗漏水排至库外。

(3) 库底土工膜防渗。上水库库底全部采用土工膜作为单一防渗层,防渗体顶部高程 807.00 m,表面防渗体由上至下依次为:0.3 m 厚土工砂袋护面层(30 kg/袋)、土工布(300 g/m²)、1.5 mm 厚 HDPE 土工膜、三维复合排水网、0.05 m 厚级配砂垫层、0.50 m 厚碎石垫层、1.20 m 厚过渡层和库底回填石渣。

该工程上水库库底回填高程根据上水库死库容、检修条件等,按土石方挖填基本平衡的原则确定。库底采用平库底,库底地形低于高程 805.00 m 部位采用石渣回填至高程 805.00 m,地形高于高程 805.00 m 区域开挖形成一个平台。土工膜在库岸坡脚处与库周观测排水廊道顶面混凝土连接,在大坝上游侧采用连接板与面板连接。组合防渗方案 1 典型剖面见图 1。

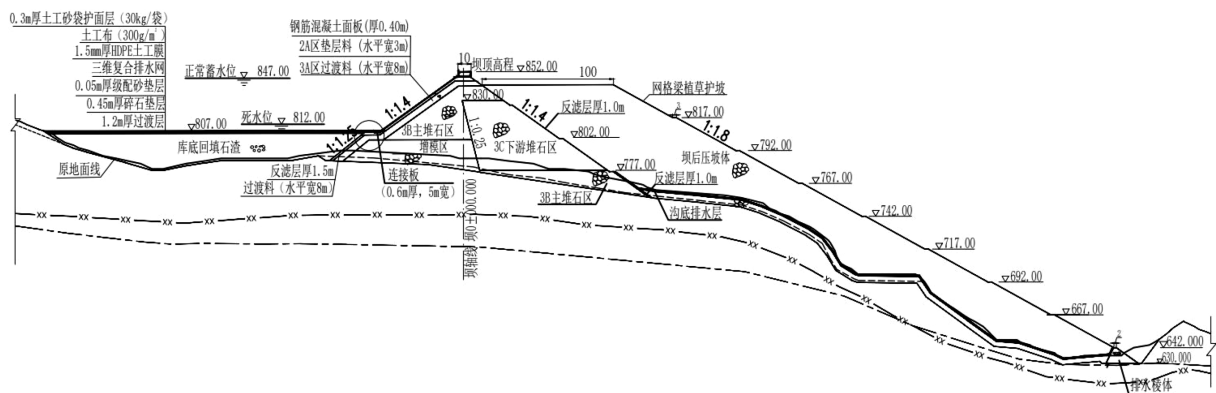


图 1 方案 1 典型剖面图

3.2 方案2

(1)大坝布置。采用沥青混凝土面板堆石坝,坝顶高程852.00 m,坝顶宽度9.00 m,最大坝高110.00 m(坝轴线处),坝轴线长440.00 m,坝顶设L型防浪墙,上游墙高4.0 m,下游墙高3.0 m。坝顶上、下游设景观栏杆,拟定大坝上游坝坡为1:1.70,下游坝坡为1:1.4,下游面沿高程每隔25.0 m设一级马道,马道宽3.0 m。

坝体堆石料分区从上游至下游依次为垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区、下游网格梁+植草护坡。垫层区及过渡区坡比均为1:1.70,其水平宽度为别为3 m和4 m。过渡料下游为主堆石区,上游坡比1:1.70,为提高填筑石料的利用率,充分利用开挖石料,在主堆石区下游设置下游堆石区,上游坡比为1:0.25,下游坡比为1:1.4,在坝体高程800.15~777.00 m设置增模区,下游堆石区高程777.00 m以下为主堆石区。大坝下游面高程841.00 m以上设置厚度为1 m的浆砌块石护坡。

(2)库岸沥青混凝土面板防渗。库岸沥青混凝土面板的坡度,应满足自身稳定的要求,不宜陡

于1:1.7,库岸可利用天然地形按1:1.70修坡至高程807.00 m附近(具体高程结合库底防渗方案确定)形成挡水库岸,库岸采用沥青混凝土面板防渗,沥青混凝土面板采用筒式结构,面板厚度为0.202 m,沥青混凝土面板下部设0.35 m厚无砂混凝土排水层,沿库底周边设排水观测廊道,与岸坡、库底防渗体系形成排水系统,并通过排水洞将渗漏水排至库外。

(3)库底沥青混凝土面板防渗。上水库库底全部采用沥青混凝土面板作为防渗层,防渗体顶部高程807.00 m,表面防渗体由上到下依次为:0.202 m厚沥青混凝土防渗层、0.6 m厚垫层料、1.2 m厚的过渡层和库底回填石渣。

采用平库底,库底地形低于高程805.00 m部位用石渣回填至高程805.00 m,地形高于高程805.00 m的地方开挖成一平台。库底沥青混凝土面板防渗体在库岸坡脚处与库周排水观测廊道顶面混凝土连接,在大坝上游侧高程807.00 m处以15 m的半径与库底面板衔接。组合防渗方案2典型剖面见图2。

3.3 方案3

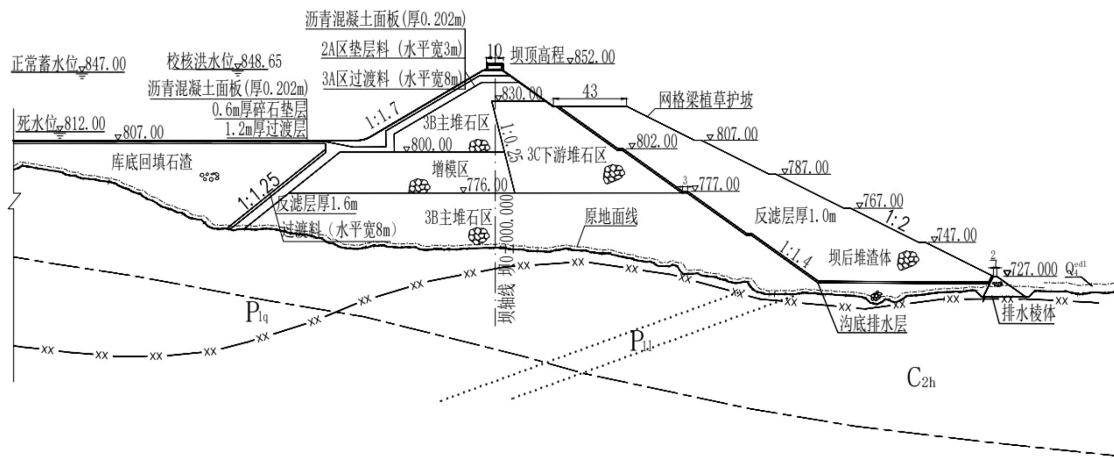


图2 方案2典型剖面图

(1)大坝布置。大坝采用沥青混凝土面板堆石坝,坝顶高程852.00 m,坝顶宽度9.00 m,最大坝高110.00 m(坝轴线处)。大坝上游坝坡为1:1.70,下游坝坡为1:1.4,下游面沿高程每隔25 m设一级马道,马道宽3.0 m。坝体堆石料分区从上游至下游依次为垫层区、过渡区、主堆石区、下游堆石区和下游“网格梁+植草”护坡。大坝采用沥青混凝土面板防渗,面板采用0.202 m

厚筒式结构,沥青混凝土面板与库底表面防渗层圆弧连接,形成封闭防渗体系。

(2)库岸沥青混凝土面板防渗。利用天然地形按1:1.70修坡形成挡水库岸,采用沥青混凝土面板防渗。沥青混凝土面板采用筒式结构,面板厚度0.202 m,面板下部设0.350 m厚无砂混凝土排水层,沿库底周边设排水观测廊道,与岸坡、库底防渗体系形成排水系统,并通过排水洞将

渗漏排水至库外。

(3) 库底土工膜防渗。上水库库底全部采用土工膜作为单一防渗层, 防渗体顶部高程 807.00 m, 表面防渗体由上至下依次为: 0.3 m 厚土工砂袋护面层(30 kg/袋)、土工布(300 g/m²)、

1.5 mm 厚 HDPE 土工膜、三维复合排水网、0.05 m 厚级配砂垫层、0.450 m 厚碎石垫层、1.2 m 厚过渡层和库底回填石渣。组合防渗方案 3 典型剖面见图 3。

4 方案比选

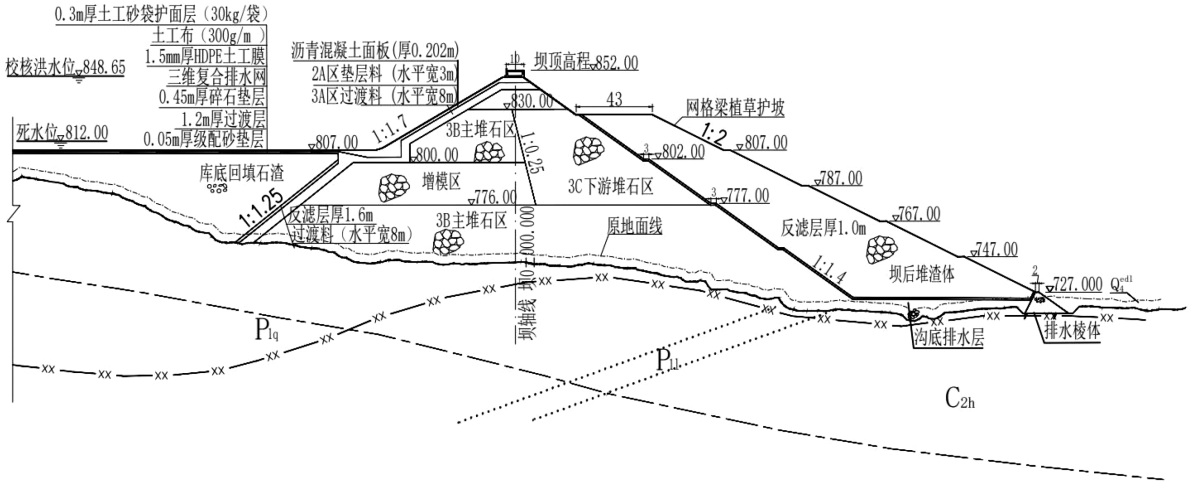


图 3 方案 3 典型剖面图

4.1 主要工程量比较

上水库坝型及防渗型式比选主要工程量比较见表 1。

表 1 上水库坝型及防渗型式比选主要工程量比较表

项目名称	单位	方案 1	方案 2	方案 3
土石方明挖	万 m ³	589.36	645.46	645.46
石方洞挖	万 m ³	2.63	2.65	2.65
土石方填筑	万 m ³	467.41	495.49	494.18
喷混凝土	万 m ³	1.24	1.37	1.37
土工膜	万 m ²	14.78	0.00	14.04
混凝土	万 m ³	11.01	5.87	5.96
沥青混凝土	万 m ³	0.00	5.44	2.79
锚杆	万根	3.03	3.31	3.31
钢筋	万 t	0.92	0.44	0.49
固结灌浆	万 m	0.49	0.49	0.49
排水孔	万 m	4.92	5.37	5.37

4.2 坝型及防渗综合比选

针对上水库大坝坝型及库盆组合防渗型式, 分别从地形地质条件、枢纽布置、施工条件、工程投资等方面进行技术经济综合比较, 坝型及防渗型式综合分析比较见表 2。

针对上表综合分析如下:

①从地形地质条件分析, 三种方案的大坝坝

基处理简单, 均能适应坝址的地形地质条件, 不存在质的差别;

②从枢纽布置条件分析, 三种方案枢纽布置格局基本相同, 方案 2 和方案 3 采用的库周沥青混凝土面板坡度较缓, 大坝断面相对较大;

③从施工条件分析, 三种方案施工技术均成熟, 方案 1 采用的钢筋混凝土面板堆石坝和库底土工膜受气象条件影响相对较小, 土工膜铺设进度快, 施工质量易控制; 方案 2 和方案 3 采用的沥青混凝土面板施工难度较大, 施工工艺复杂, 且需单独设置一套沥青混凝土拌和系统, 方案 1 相对较优;

④从适应变形能力分析, 上水库库底采用石渣回填, 存在不均匀沉降及变形不协调问题, 土工膜较沥青混凝土面板而言适应库底基础不均匀变形能力强, 极限抗拉强度大于沥青混凝土面板, 方案 1 和方案 3 相对较优;

⑤从运行检修条件分析, 库底沥青混凝土护面与土工膜护面一旦破坏均可通过放空水库进行修复, 检修方便, 三种方案基本相当;

⑥从工程量角度分析, 钢筋混凝土面板坝上游坝坡采用 1:1.4, 沥青混凝土面板堆石坝上游坝坡采用 1:1.7, 坝坡相对较缓, 坝体开挖、填筑

表 2 坝型及防渗型式综合分析比较表

比选项目	方案 1	方案 2	方案 3	比较
地形地质条件	上水库位于宝华河支流上,地形呈“圈椅”状,为北东东向冲沟,溪沟较陡,沟底平均坡降约 17%。库周地形分水岭均高于水库设计正常蓄水位 847.00 m,地形分水岭宽厚。库盆周边地形较整齐,冲沟较少发育,无低于正常蓄水位的堰口,地形封闭条件较好。库盆岩溶发育强烈,拟定全库盆防渗。			具备修建坝型地形条件
枢纽布置	建筑物布置协调、顺畅	建筑物布置协调、顺畅,断面大	建筑物布置协调、顺畅,断面大	布置基本相同
防渗技术特点	钢筋混凝土面板防渗性能好;能较好适应坝体的变形;面板需分块,块间设置变形缝	沥青混凝土面板防渗性能好;良好的柔性可以较好地适应坝体的变形;整体防渗体为一个整体,不需设置变形缝,但与库周防渗方式结合部分需设置变形缝		基本相当
施工条件	施工技术成熟,不受雨季干扰;土工膜施工快捷,施工质量易控制。	施工技术成熟,但雨季施工受到一定影响,施工项目多施工程序繁杂,需设置专用的沥青混凝土拌和系统		方案 1 稍优
适应变形能力	土工膜适应库底基础不均匀变形能力强,极限抗拉强度大于沥青混凝土面板	沥青混凝土面板适应库底基础不均匀变形能力较强	土工膜适应库底基础不均匀变形能力强,极限抗拉强度大于沥青混凝土面板	方案 1 和方案 3 稍优
检修条件	检修方便	基本相当		
工程量	坡陡 1:1.4,库岸开挖量较小,工程量小	坡缓 1:1.70,库岸开挖量较大,填筑量较大	坡缓 1:1.70,库岸开挖量较大,填筑量较大	方案 1 优
与方案 1 工程投资差额	0	5 272.11 万元	842.13 万元	方案 1 优

量相对较大,方案 1 稍优;

⑦从工程投资分析,方案 2 较方案 1 增加投资 5 272.11 万元,方案 3 较方案 1 增加投资 842.13 万元,从投资角度分析,方案 1 工程投资省。

综上所述,方案 2 和方案 3 在枢纽布置、施工条件、工程量和工程投资等方面与方案 1 比较均不占优势,故本阶段推荐方案 1 作为代表方案,即上水库大坝采用钢筋混凝土面板堆石坝坝型,库盆防渗型式采用“库岸钢筋混凝土面板+库底土工膜”方案。

5 结 语

笔者从地形地质条件、枢纽布置、施工条件、适应变形、运行检修和工程量及投资等方面综合比较了“钢筋混凝土面板堆石坝+库岸钢筋混凝土面板+库底土工膜”“全库盆沥青混凝土面板防渗方案”“沥青混凝土面板堆石坝+库岸沥青混凝土面板+库底土工膜”三个方案。钢筋混凝土面板堆石坝坡度陡,开挖填筑量小,土工膜施工受雨季干扰小,铺设进度快,适应变形能力强,检修方

便,工程量少投资少,故推荐采用上水库大坝采用钢筋混凝土面板堆石坝坝型,库盆防渗型式采用库岸钢筋混凝土面板+库底土工膜方案。

参考文献:

- [1] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 抽水蓄能电站设计[R]. 上海:中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 2012. 12.
- [2] 张亚彬. 甘肃省玉门抽水蓄能电站下水库坝型及库盆防渗方式比选分析研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(12): 53-57.
- [3] 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司. 湖北省远安抽水蓄能电站可行性研究阶段枢纽布置格局比选专题报告[R]. 长沙:中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2022.
- [4] 刘要来,穆君,郑小伟,等. 五岳抽水蓄能电站上水库防渗型式比选研究[J]. 四川水力发电, 2020, 39(05): 85-88+92.
- [5] 石含鑫,常姗姗. 溧阳抽水蓄能电站上水库防渗形式选择[J]. 水力发电, 2010, 36(07): 50-52+78.

作者简介:

李峥祥(1991-),男,河南焦作人,工程师,硕士,从事水工结构及尾矿库设计与咨询工作。(责任编辑:廖益斌)

喀麦隆纳齐提加水电站 2024 年 9 月投产

2023 年 7 月 18 日,在喀麦隆中部地区纳齐提加大坝蓄水仪式上,喀水资源与能源部长宣布,总装机 420 兆瓦的纳齐提加水电站(喀最大水电站)将于 2024 年 9 月全部投产,其中首台 60 兆瓦发电机组将于 2023 年 12 月投产,每年可向南部互联电网输送约 2 970 GWh 电力。水电站每度电发电成本为 42 中非法郎(约 0.07 美元),远低于火力发电的 200 中非法郎成本,可为喀节约大量资金。此外,预计 2026 年喀南北电网互联建设完成,纳齐提加水电站还将提高北部电气化水平,缓解喀北部地区供电紧张局面。

(新闻来源:商务部)