

某抽水蓄能电站高面板堆石坝坝体分区优化

王樱峻^{1,2}, 赵琳^{1,2}, 雷显阳¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;
2. 浙江省抽水蓄能工程技术研究中心, 浙江 杭州 311122)

摘要:针对某抽水蓄能电站上水库主坝最大坝高达182.3 m,上水库土石料料源紧张,坝地质条件复杂,岸坡起伏差大,大坝变形及防渗结构可靠性要求高等问题,为提高大坝安全性能,研究主坝断面分区优化方案。坝体分区优化充分考虑利用上水库石料厂开挖的石料筑坝;上、下游堆石区分界线坡比采用倾向下游1:0.4;在坝顶以下部位设置增模区;连接板向库内平移并减小转弯段曲率,并将基础垫层优化为特殊垫层及过渡料。实验表明该优化方案有效保证了结构的安全。

关键词:沥青混凝土;面板堆石坝;坝体分区;抽水蓄能电站;增模区;变形控制

中图分类号:TV641 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)05-0047-06

Dam zoning optimization for a high concrete face rockfill dam of a pumped storage power station//WANG Yingjun^{1,2}, ZHAO Lin^{1,2}, LEI Xianyang¹(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Pumped Storage Engineering Center of Zhejiang Province, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In view of the problems that the maximum main dam height of a pumped storage power station is 182.3m, the soil and stone material source of the upper reservoir is scarce, the geological conditions of the dam foundation are complex, the bank slope fluctuation is large, and the reliability requirements of the dam deformation and anti-seepage structure are high, a zoning optimization scheme of the main dam section was studied to improve the safety performance. The stones excavated by the stone factory in the upper reservoir is fully considered to build the dam. The slope ratio of the upstream and downstream rockfill boundary is set to be 1:0.4. Modulus-increased zone is set below the dam crest. In order to ensure the structural safety, the connecting plate is translated into the reservoir with a reduction of the turning section curvature, and the foundation cushion is optimized into special cushion with special transition material.

Key words: asphalt concrete; face rockfill dam; dam zoning; pumped storage power station; modulus-increased zone; deformation control

沥青混凝土面板防渗性能良好,渗透系数小于 10^{-8}cm/s ,且具有较强的适应基础变形和温度变形能力^[1]。近年来沥青混凝土面板堆石坝在抽水蓄能电站中得到广泛应用。目前我国已建、在建抽水蓄能电站已超过60座。从早期的天荒坪、张河湾、西龙池抽水蓄能电站工程,到后来的宝泉、呼和浩特等工程,上(下)水库大坝均采用沥青混凝土面板堆石坝坝型,其中西龙池下水库大坝坝高97.4 m,坝基建于深厚覆盖层上,为该类工程已建最高大坝。随着这些工程的建成,我国已全面掌握了现代沥青混凝土面板堆石坝设计和施工技术,建设地域也从气候温和地区(天荒坪)、寒冷地区(张河湾、宝泉)发展到严寒地区(西龙池、呼和浩特)^[2-4]。但是,以往的成功经验仅适用于坝高100 m以下的水库大坝,随着坝高增大,堆石体的应力水平增高、变形增

大。高面板堆石坝的设计应以变形控制、变形协调为核心,考虑土石方挖填平衡因素,应从堆石材料选择、坝体分区、压实标准及级配等多角度出发,研究确保大坝安全的技术方案^[5-6]。目前我国100 m坝高以上的沥青混凝土面板堆石坝,工程建设经验不多,需结合具体工程开展深入研究和论证。

本文阐述了某抽水蓄能电站高达182.3 m的上水库主坝沥青混凝土面板堆石坝坝体分区优化设计。在工程实施阶段,通过进一步优化上、下游堆石区分界坡比,坝顶以下设置增模区,两岸岸坡铺设过渡料,优化防渗体连接板及其基础垫层,调整坝基排水带,下游护坡增设封闭层等一系列技术措施,成功解决了该工程面临的上水库土石料料源紧张,坝地质条件复杂,岸坡起伏差大,大坝变形及防渗结构可靠性要求高等问题。

作者简介:王樱峻(1969—),男,教授级高级工程师,主要从事水电工程水工设计研究。E-mail:wang_yj1@hdec.com

1 上水库工程布置

1.1 工程地质概况

上水库位于仑山主峰西南侧大哨沟的沟源坳地,东、北、西三面由高程 288.30~400.40 m 山脊及垭口组成,东南侧为冲沟,沟底高程约为 90~150 m。边坡整体上陡下缓,北库岸山脊坡度 5°~15°,西库岸和东库岸山脊坡度 20°~30°。高程 200~260 m 以上库岸弱~微风化白云岩大片出露,覆盖层主要分布在库盆中下部,沟底厚 5~18 m;闪长玢岩岩脉呈 NNW 向密集侵入,岩体风化深。

主坝位于大哨沟沟口,为“V”形谷,两岸地形不对称,岩性为硅质白云岩、硅质条带白云岩,右岸闪长玢岩脉大量侵入。坝址区断层发育,分布有 F₇、F₈、F₉ 等大小断层 11 条,多为 NNW 向,中陡倾角。溶洞、溶沟发育,两岸地下水位及相对隔水层顶板埋藏深,存在坝基及绕坝渗漏问题。

1.2 总体布置

上水库流域面积约为 0.63 km²,由主坝、副坝和库周山岭围成。正常蓄水位 267.00 m,死水位 239.00 m,总库容 1748 万 m³,有效库容 1577 万 m³。主、副坝坝型均为沥青混凝土面板堆石坝,坝顶高程 272.40 m,主坝最大坝高 182.30 m,坝顶长度 811.45 m,坝顶宽度 10.00 m。库盆由一库底大平台及库周 1:1.7 坡比的开挖坡围成,库底平台高程 236.50~237.00 m。上水库采用“库岸沥青混凝土面板+库底土工膜”防渗方案。沿库周设库岸公路,路面宽 8.50 m,总长约为 3.0 km。

上水库平面布置、石料场 A 区、B 区及 C 区分布见图 1。大坝及库底填筑需要的石料,从库盆石

料场开采,其中 B 区石料场全、强风化玢岩岩脉发育,所开采混合料用于下游堆石区及库底填筑。主、副坝和库盆填筑量近 3000 万 m³。2018 年 10 月,主体工程正式开工,2021 年 4 月,上水库主坝已填筑至 193.00 m 高程。

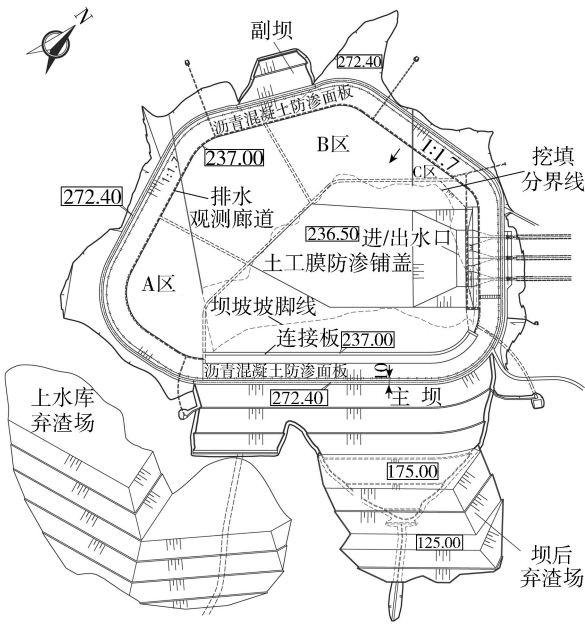


图 1 上水库平面布置及料场分区(单位:m)

2 可行性研究阶段上水库主坝坝体分区

2.1 坝体结构

上水库主坝坝体上游面坡比 1:1.7,采用沥青混凝土面板进行防渗,下游面 240 m 高程以上坡比 1:1.9,以下 1:1.8,每隔 35 m 设宽 3.0 m 的马道。下游坝坡采用“混凝土框格梁+干砌石”护坡。坝后设 2 个弃渣场,顶高程分别为 175.00 m 和 180.00 m。上水库主坝坝体典型断面见图 2。

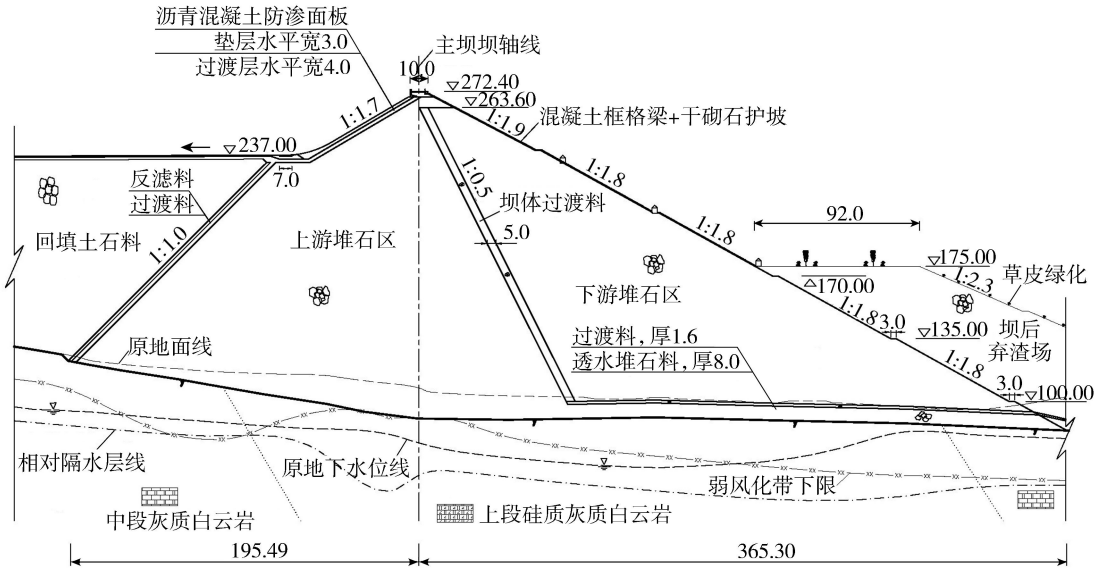


图 2 上水库主坝典型断面(单位:m)

2.2 坝体分区

坝体分区原则如下:从上游向下游各料区渗透性依次递增(下游堆石区除外);在水压力作用下坝体变形小;各区变形模量相近、变形协调;最大程度利用工程开挖料,料区划分尽可能简单^[7-10]。根据上述原则,主坝坝体分成垫层区、过渡区、上游堆石区、下游堆石区等。大坝沥青混凝土面板与库底土工膜之间采用连接板衔接,顶高程237.00m,其下设垫层区及过渡区。连接板以下坝体设置水平宽度2.0m的反滤区和3.0m的过渡区,以及上、下游堆石区。连接板以上大坝垫层区及过渡区坡比1:1.7,水平宽度3.0m、5.0m。上、下游堆石区分界坡比1:0.5(倾向下游),两者之间设水平宽5.0m的过渡区。在下游堆石区下部设置透水堆石排水层,岸坡部位厚3.0~5.0m,河床部位厚8.0m。在大坝下游坡脚,设置量水堰挡墙收集坝体渗水并进行量测。

3 施工图阶段上水库主坝坝体分区优化

施工图阶段上水库主坝坝体分区优化主要包括上、下游堆石区分界坡比优化,坝顶以下设置增模区,布置连接板及调整基础垫层,调整坝基排水带,优化坝体和两岸坡坝基过渡区以及下游护坡等。主坝坝体断面优化典型断面见图3。

3.1 上、下游堆石区分界坡比

高面板堆石坝上、下游堆石区分界坡比采用倾向下游1:0.5的设计,这是国内坝工界公认的坡比。萨尔瓦欣纳面板堆石坝最大坝高约为148m,采用此坡比,下游堆石压缩模量仅为上游的1/5,没有出现上游面的受拉现象^[11-12]。

可行性研究阶段试验表明,该工程下游堆石料采用的白云岩与全、强风化玢岩混合料质量较差,其

压缩模量仅为上游堆石的1/3~1/4。因此,上、下游堆石区分界倾向下游1:0.5或接近1:0.5是合适的。施工图阶段,经土石方挖填平衡分析,堆石区分界倾向下游1:0.4方案比1:0.5方案节省上游堆石料约70万m³。考虑到上游堆石料料源偏紧,最终采用倾向下游1:0.4方案。虽然上游面坡比为1:1.7,但连接板以下的上游堆石坡比只有1:1.0,大坝上游综合坡比约为1:1.3,因此上、下游堆石分界线坡比仍应按照高面板堆石坝的分区原则确定。

3.2 坝顶以下增模区

面板堆石坝震害观察和振动台动力模型试验表明,坝顶附近动力放大效应,导致坝顶以下一定范围的震损较严重。该工程上水库主坝属高堆石坝,抗震设防烈度为8度,在坝顶以下1/5~1/6坝高范围内提高堆石密度,可减小地震作用下堆石料剪缩,从而减小震后坝体变形及面板震损程度^[13]。

计算结果表明,该工程蓄水20a产生的最大流变沉降45.1cm,占坝高的0.24%,最大流变水平位移18.4cm。流变沉降主要发生在坝体下游堆石区和库底回填区,流变水平变形发生在坝顶附近。坝体内部主应力有所增加。从整体来看,流变作用对于坝体应力影响不大,但对位移有一定影响。多个工程研究发现,对于高堆石坝,考虑堆石流变后的坝体变形较为明显^[14-15]。同时,抽水蓄能电站水库水位频繁变化,对运行期变形影响不可忽视。监测资料表明,某蓄能电站大坝初始运行期的变形速率甚至大于初期蓄水期^[16]。为减小堆石流变及蓄能电站消落带水荷载影响,在坝顶以下一定范围提高堆石密实度是必要的。

结合该工程白云岩料源较紧张的情况,坝体分区进行如下优化:坝顶以下20m(约1/6坝高)范围

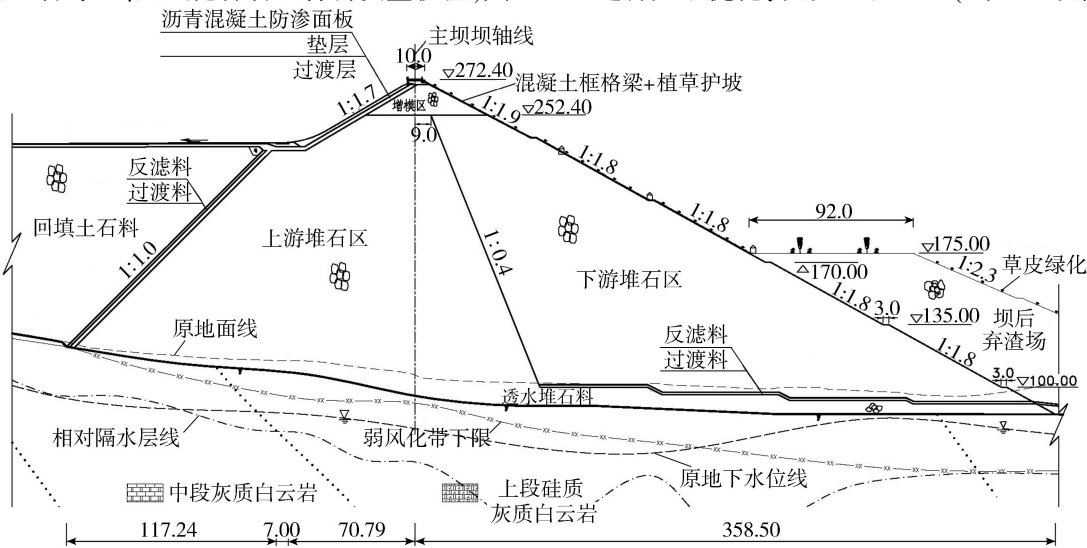


图3 上水库主坝坝体断面优化典型断面(单位:m)

内设置增模区,采用弱、微风化白云岩级配堆石料;孔隙率小于16%;最大粒径500 mm;小于5 mm 颗粒的质量分数不大于20%;碾压层厚60 cm,洒水10%,大型振动碾碾压10~12遍。

3.3 连接板及基础垫层

a. 连接板。计算分析表明,正常蓄水位时连接板与大坝面板底部位移分布规律相同,最大位移矢量和为0.23 m。由于沥青混凝土柔性好,连接板与面板变形较协调,但连接板与土工膜锚固处存在不均匀变形问题,需通过基础垫层局部适应性措施予以解决。

从受力方面分析,连接板存在两侧向中央挤压的变形趋势,在大坝中部附近存在较大的压应力,大主应力最大为5.0 MPa左右,小于混凝土允许抗压强度。在平面反弧段,在水压力作用下,连接板向两侧张拉,此处的小主拉应力为4.2 MPa左右,已超过一般混凝土的抗拉强度。施工图阶段,对连接板平面布置进行了调整:往库内方向平移约10 m,同时减小了平面反弧段连接板曲率。调整后连接板转弯处的小主拉应力仅为1.5 MPa左右。通过平面布置优化、加强配筋等措施,解决了连接板局部拉应力过大的问题。

b. 基础垫层。由于连接板下部为垫层、过渡层及上游堆石区,而土工膜下部为库盆回填料,两者的软硬程度不同,蓄水后在土工膜锚固部位会产生较大的变形梯度^[17]。通过采用子模型法^[18]进行精细化模拟计算得出,土工膜锚固处拉应变达3.75%。PE土工膜的应变极限值为12%,考虑3.0的安全系数,土工膜承受的拉应变与设计允许值4%较为接近。研究表明,连接板基础垫层料向库盆方向延伸约10 m,并在靠近连接板部位设置宽度1 m、高度0.24 m的鼓包后,土工膜局部拉应变显著减小至0.67%,见图4。为此,进行基础垫层设计优化。

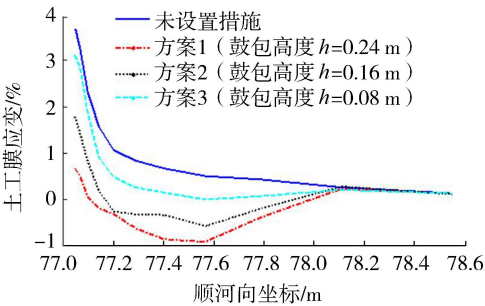


图4 土工膜与连接板锚固处应变分布

连接板是大坝面板和库底土工膜的连接体,是易产生渗漏的薄弱环节。基础垫层渗透系数低,可起到限漏作用,相当于大坝防渗体第二道防线^[5,19]。为此,将连接板基础垫层调整为厚度1.6 m的特殊垫层料,以及厚度2 m的过渡料。特殊垫层料为连续级配料,最大粒径为40 mm,小于5 mm 颗粒质量

分数占40%~50%。

3.4 坝基排水层

现场碾压试验表明,下游堆石料中的玢岩含量较高,碾压后小于5 mm 颗粒质量分数一般在20%~30%之间,典型级配曲线见图5。施工过程中,因少量混合料的摊铺不能保证非常均匀,局部细颗粒会更加集中。为保护下游堆石区中的细颗粒,将大坝下游堆石区与坝基排水带之间原设置160 cm厚的过渡料,调整为40 cm厚反滤料和120 m厚过渡料。为便于大坝填筑料分层碾压施工,将40 cm厚反滤料和120 m厚过渡料设置成4个大平台,见图3。

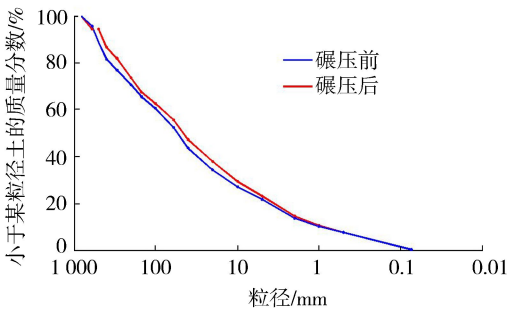


图5 主坝下游堆石区碾压试验典型级配曲线

3.5 坝体及岸坡坝基过渡区

上、下游堆石区之间设水平宽5 m的过渡区,采用上、下游堆石料互层填筑的方式建成,施工过程较复杂。计算表明面板挠度仅为14.2 cm,上游堆石区足够支撑面板,设置过渡区意义不大。为方便施工,取消坝体过渡区。

主坝坝址区坝基岩性为白云岩,挖除覆盖层后,两岸石笋、石芽遍布,经基础处理后,仍有一定起伏差,直接填筑上游堆石料(最大粒径70 cm)存在局部架空、难以压实现象,为保证岸坡部位堆石料压实质量,实现岸坡堆石区与河床堆石区的变形协调^[20],在岸坡部位设置水平宽2.5 m的过渡料,最大粒径30 cm。

3.6 下游护坡优化

下游堆石区填筑易崩解风化的玢岩,只要减少其与空气的接触,就可大幅减缓其崩解速率。因此,将坝后护坡方案优化为“混凝土框格梁+混凝土预制块+黏土植草”方案,以隔绝下游堆石料与空气接触,同时有利于提升坝后坡的抗震性能。

3.7 三维有限元计算分析

针对优化后的坝体断面,进行三维有限元计算分析。沥青混凝土及堆石体静力计算模型采用邓肯模型,面板与垫层间采用薄层单元模拟接触面特性。坝料参数采用室内试验成果,如表1所示。采用逐级加载方案,按照135 m高程以下→135~170 m高程→170~205 m高程→205~240 m高程→240~272.40 m高程的施工工序进行填筑,最后浇筑面

板。水荷载分 10 级模拟,每级水头 3 m。坝体变形计算结果见图 6 至图 8。

表 1 上水库筑坝材料邓肯模型参数

筑坝材料	干密度 $\rho_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi_0/$ ($^\circ$)	$\Delta\varphi/$ ($^\circ$)	弹性模量 数量 K	弹性模量 指数 n	破坏比 R_f	体积模量 数 K_b	体积模量 指数 m
垫层区料	2.34	53.4	8.3	962.8	0.34	0.62	690.8	0.25
过渡区料	2.31	55.2	10.1	1182.2	0.28	0.7	744.1	0.17
上游堆石料	2.28	54.4	10.2	1094.5	0.26	0.69	620.1	0.17
下游堆石料	2.01	52.6	8.4	291.1	0.43	0.76	95.0	0.40
库盆回填料	1.91	35.6	7.0	219.8	0.45	0.75	95.0	0.44

注: φ_0 为 σ_3 等于大气压时的内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为 σ_3 增大 10 倍时 φ_0 的减小值。

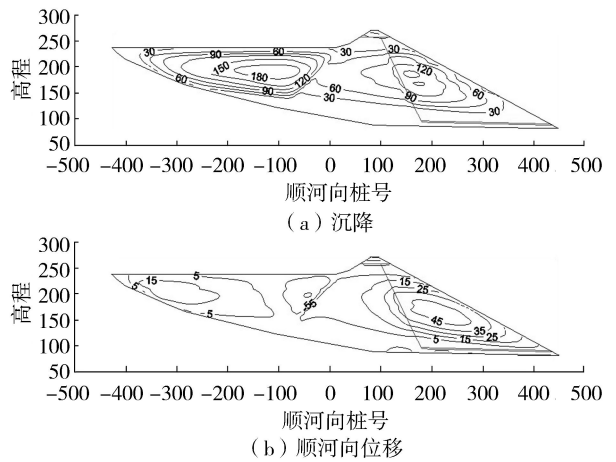


图 6 竣工期变形等值线(单位:cm)

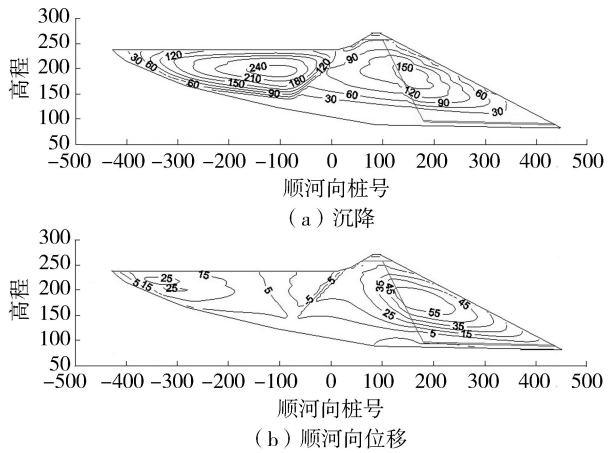


图 7 蓄水期变形等值线(单位:cm)

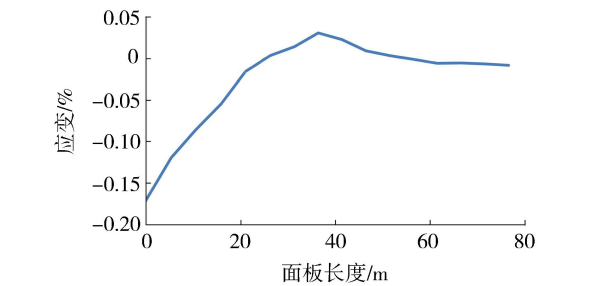


图 8 蓄水期沥青混凝土面板顺坡向应变(以压为正)

竣工期坝体最大沉降 155 cm,最大沉降位于下游堆石区,蓄水期最大沉降 169 cm;竣工期上、下游向水

平移移最大值分别为 11 cm 和 51 cm,蓄水后上游水平位移减小至 9.8 cm,下游水平位移增大至 59 cm。运行期上、下游水平位移分别为 1.2 cm 和 8 cm。

竣工期坝体大、小主应力最大值为 3.05 MPa 和 1.03 MPa,应力水平最大值为 0.61,发生在上、下游堆石区分界面中部。蓄水后,应力等值线明显上抬,应力水平降低。在水压力作用下,面板最大挠度出现在中部附近,最大值为 14.2 cm。库底及反弧区面板基本处于受拉状态,斜坡段面板受压,顶部面板受拉。面板与连接板接头部位最大拉应变为 0.17%,小于设计控制值 0.5%,面板的应变状态总体良好,见图 8。总体上,计算成果符合高堆石坝的应力变形规律,两岸地形缓,未出现明显拱效应^[10,21-22]。

4 上水库主坝坝体断面分区设计特点

a. 上水库主坝最大坝高 182.3 m,大坝基础地质条件及填筑料料源岩性复杂,因此,应按照高堆石坝设计理念做好大坝变形控制及变形协调,设置可靠防渗结构。上、下游堆石的分界线要保证面板挠度小、堆石上游面不产生拉应变^[7]。结合工程经验及计算分析,该工程分区界线采用倾向下游 1:0.4 坡比。同时,对坝体填筑料,提出设计孔隙率及级配要求,以保证施工过程中坝料压实。坝顶以下设置增模区,可控制震后、运行期坝体变形。

b. 施工图阶段,结合坝料填筑参数、碾压试验成果复核邓肯模型参数,采用精细化单元网格进行坝体应力变形复核,进一步验证坝体断面分区方案的技术合理性。

c. 连接板是大坝沥青混凝土面板和库底土工膜的连接体。上水库库底填渣高度约为 120 m,为保证连接结构安全,施工图阶段开展深入研究,连接板平面布置往库内平移并减小转弯段曲率,改善了其受力状况,同时在连接板附近设置鼓包,显著减小了土工膜局部拉应变;将基础垫层优化为特殊垫层及过渡料,适当增加基础垫层的细颗粒含量,对于连接板部位的渗流控制来说,是至关重要的^[4]。

d. 上水库填筑工程量大,减少工程弃渣,做好土石方挖填平衡非常重要。主坝坝体断面分区充分考虑石料料源偏紧情况,利用 B 区石料场的全、强风化玢岩岩脉与白云岩混合料填筑于下游堆石区。

e. 针对坝基工程地质条件及料源特性,因地制宜,采取合理可行的技术措施。主坝坝址区坝基两岸石笋、石芽遍布,在岸坡部位设置水平宽 2.5 m 的过渡料;坝后护坡方案调整为“混凝土框格梁+混凝土预制块+黏土植草”,减缓了玢岩崩解速率,同时兼顾抗震措施。

5 结 语

某抽水蓄能电站上水库主坝为高沥青混凝土面板堆石坝,工程规模大,技术要求高。坝体断面分区在施工图阶段进行了优化设计,遵循高面板堆石坝的设计原则,并充分考虑利用库盆开挖的全、强风化玢岩料筑坝,较好地实现了土石方挖填平衡。同时,深入开展三维有限元分析研究,进一步验证技术方案的合理性。随着设计理念的提升,施工技术的发展,以及数值分析手段的应用,在高面板堆石坝建设过程中,还需在大坝变形控制和防渗结构安全性等方面进行探索和创新。

参考文献:

- [1] 刘东海,赵梦麒. 心墙沥青混凝土压实 PFC 模拟细观参数反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 53-59. (LIU Donghai, ZHAO Mengqi. Meso-structural parameters inversion of PFC model for compaction of asphaltic concrete in core wall[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 53-59. (in Chinese))
- [2] 张春生,张克钊. 天荒坪抽水蓄能电站上水库沥青混凝土护面设计及裂缝处理[J]. 水力发电, 2007, 33(1): 37-39. (ZHANG Chunsheng, ZHANG Kezhao. Design and treatment on asphaltic concrete facing of upper reservoir in tianhuangping pumped storage power station [J]. Water Power, 2007, 33(1): 37-39. (in Chinese))
- [3] 韩瑞,夏世法,杨明成. 沥青混凝土面板防渗技术在呼蓄上库的应用[J]. 西北水电, 2015(6): 28-31. (HAN Rui, XIA Shifa, YANG Mingcheng. Application of permeability technology in asphalt concrete face slab of upper reservoir, Huhehaote Pumped Storage Power Plant [J]. Northwest Hydropower, 2015(6): 28-31. (in Chinese))
- [4] 王樱峻,李金荣. 天荒坪抽水蓄能电站上水库设计特点及技术发展[J]. 水电与抽水蓄能, 2018(5): 20-25. (WANG Yingjun, LI Jinrong. Design features and technical development of upper reservoir of Tianhuangping Pumped Storage Power Station [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2018(5): 20-25. (in Chinese))
- [5] 徐泽平. 超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 51-53, 59. (XU Zeping. Key technical problems on the construction of super-high CFRD [J]. Water Power, 2010, 36(1): 51-53, 59. (in Chinese))
- [6] 王君利. 混凝土面板堆石坝设计技术进步及安全理念展望[J]. 西北水电, 2020(1): 11-18. (WANG Junli. Design technology progress and safety concept prospect of concrete faced rockfill dam [J]. Northwest Hydropower, 2020(1): 11-18. (in Chinese))
- [7] 熊燕梅. 利用库盆开挖料填筑面板堆石坝的坝体设计和结构静动力分析[J]. 大坝与安全, 2017(1): 20-24. (XIONG Yanmei. Design and structural static and dynamic force analysis of concrete face rockfill dam

- constructed by reservoir basin excavated material [J]. Large Dam and Safety, 2017(1): 20-24. (in Chinese))
- [8] 刘东海,张钊,陈辉. 填筑形象对土石坝结构性能影响的精细有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 514-522. (LIU Donghai, ZHANG Zhao, CHEN Hui. Precise finite element analysis on influence of construction appearances to earth-rock dam structural behaviors [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 514-522. (in Chinese))
- [9] 酆能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. 中国工程科学, 2011, 13(3): 12-18, 28. (LI Nenghui. New design concept of concrete face rockfill dam [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(3): 12-18, 28. (in Chinese))
- [10] 朱安龙,张胤,廖洁,等. 大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 48-55. (ZHU Anlong, ZHANG Yin, LIAO Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 48-55. (in Chinese))
- [11] 马洪琪,曹克明. 超高面板坝的关键技术问题[J]. 中国工程科学, 2007, 9(11): 22-26. (MA Hongqi, CAO Keming. Key technical problems of super high concrete face dam [J]. Engineering Sciences, 2007, 9(11): 22-26. (in Chinese))
- [12] 曹克明,徐建军. 高面板堆石坝设计原则探讨[J]. 水力发电, 2012, 38(1): 22-26. (CAO Keming, XU Jianjun. Design principles of very-high concrete face rockfill dam [J]. Hydroelectric Power Generation, 2012, 38(1): 22-26. (in Chinese))
- [13] 朱晟. 土石坝震害与抗震安全[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 40-51. (ZHU Sheng. Earthquake-induced damage and aseismic safety of earth-rock dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 40-51. (in Chinese))
- [14] 潘家军,饶锡保,徐晗,等. 坝料流变对高面板堆石坝的应力变形影响研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(8): 281-284, 294. (PAN Jiajun, RAO Xibao, XU Han, et al. Effect of rockfill creep to stress and displacement in high CFRD [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(8): 281-284, 294. (in Chinese))
- [15] 王永明,董育烦,朱晟. 考虑后期变形影响的高面板堆石坝工作性态[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 24-27. (WANG Yongming, DONG Yufan, ZHU Sheng. Working behavior of high concrete face rockfill dam considering the influence of later deformation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 24-27. (in Chinese))
- [16] 张博,朱晟. “蓄水-泄水”循环荷载作用下高面板堆石坝的稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 81-83. (ZHANG Bo, ZHU Sheng. Stability analysis of high concrete face rockfill dam under cyclic loading of “impoundment discharge” [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2018, 36(11): 81-83. (in Chinese)) (下转第 75 页)