

高寒地区蓄集峡面板堆石坝抗冻防裂关键技术

李远程 韩 健 史海英

(工程设计院)

[摘要] 总结了国内高寒地区已建面板堆石坝抗冻防裂的工程案例和经验教训,得出了高寒地区面板坝垫层料容易发生冻胀破坏,影响面板稳定,面板混凝土的抗冻、防裂问题突出,库区冰盖对面板的破坏效应显著,常规表层止水难适应冰盖作用力等重要结论。在建的高寒、高蒸发地区蓄集峡高面板坝在先前工程经验基础上,使用兼具排水和防渗的垫层料;加厚面板、提高抗冻抗渗强度等级、减小水化热、掺加纤维等工程措施;冬季施工时,减小碾压层厚,增加动碾遍数,在暖季大量补水,保证了压实标准;使用下沉式止水减小了和冰面的接触面积,提高了抗冰冻性能,本工程所采取的抗冻防裂关键技术措施,可为同气象条件下的面板坝提供参考。

[关键词] 高寒地区 蓄集峡 抗冻防裂 面板坝 关键技术

1 工程概况

蓄集峡水利枢纽工程位于青海省西北部,行政隶属海西蒙古族藏族自治州德令哈市蓄集乡,工程位于德令哈市东北约60 km的巴音河上。巴音河是柴达木盆地东北部最大的内陆河流,发源于祁连山支脉却鲁力安吉勒,源地海拔高程5000 m以上。该工程控制流域面积4970 km²;河道平均比降12‰,坝址多年平均流量8.73 m³/s,年径流量2.75亿 m³,占巴音河流域水资源总量的54.46%,最大坝高121.50 m,有效库容1.39亿 m³,调节库容1.37亿 m³,具有多年调节能力;装机总容量33 MW。蓄集峡水利枢纽属Ⅱ等工程,工程规模为Ⅱ(2)型。

本流域地处欧亚大陆腹地,属大陆性北温带寒冷气候区。冬寒夏凉,无霜期短,日照时间长,空气干燥,降水量少,且多集中于夏季。冬季漫长寒冷,多大风,暖季短。该地区年平均气温4.0℃,历年极

端最高气温34.7℃,历年极端最低气温-30℃,年平均无霜期128 a。年平均降水量180.5 mm、蒸发量2098.2 mm,年平均风速2.3 m/s、最大风速18.0 m/s。

主要建筑物及分级:混凝土面板堆石坝为1级,溢洪道、引水发电洞、放空洞及其进水口为2级,电站厂房为3级。混凝土面板堆石坝坝顶高程为3472.00 m,坝顶上游侧设高1.20 m防浪墙,下游设栏杆。坝顶宽度8.00 m,坝顶长度365.00 m。上游坡为1:1.4,下游单级坝坡1:1.25,下游坡设置之字形上坝路,之字路宽9.00 m,坡比为10%,下游综合边坡为1:1.8。坝体由上游盖重区、铺盖区、混凝土面板、垫层料、过渡料、主堆、下游堆石区、下游块石护坡等组成,大坝横剖面见图1。

蓄集峡面板坝属于典型的在高寒、高蒸发地区建造高面板坝案例,抗冻裂问题需充分重视,表1给出了德令哈气象站气温要素统计表。

表1 德令哈气象站1972—2000年气温要素统计表

项目	单位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
平均气温	℃	-10.9	-6.4	-0.6	5.6	10.9	14.2	16.4	16.1	11.2	4.1	-3.7	-8.8	4.0
极端最低气温	℃	-27.2	-24.1	-21.3	-10.9	-7.4	-2.5	2.0	-0.9	-4.5	-12.9	-20.3	-30.0	-30.0

作者简介:李远程(1986),男,河南省方城人,工程师,硕士,从事水利水电工程设计及研究工作。

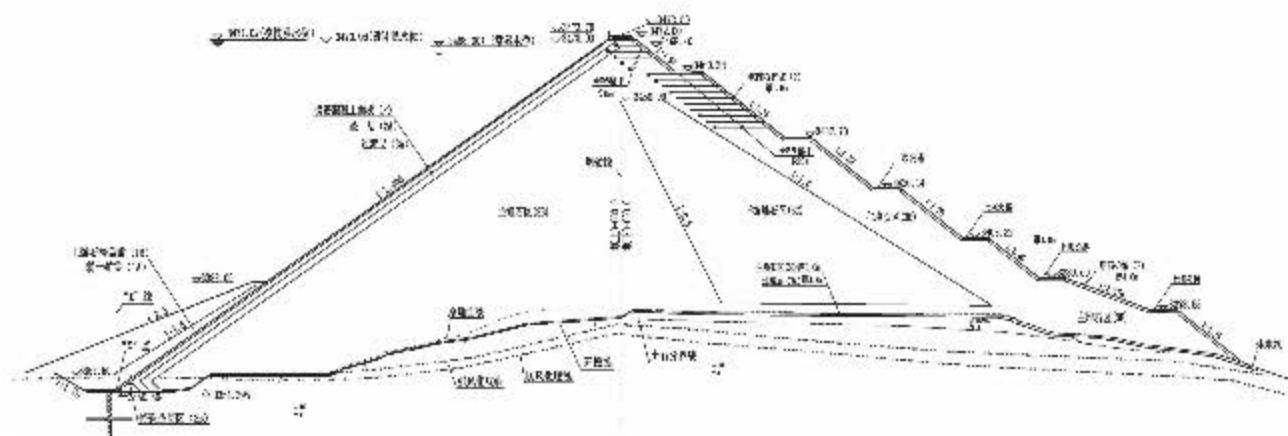


图1 大坝典型横剖面

2 国内防冻裂措施回顾

面板坝以其良好的适应性在我国得到广泛的应用,单就气象条件而言,不存在制约建造面板坝的控

制性因素,在我国西北、东北高海拔的严寒、寒冷恶劣自然条件下,已建成了 20 余座混凝土面板堆石坝,表 2 给出了国内部分建成高寒地区面板坝的资料。

表 2 国内部分建成在建高寒地区面板坝统计表

序号	坝名	所在地	坝高 (m)	坝顶高程 (m)	坝址 纬度	极端最低 温度(℃)	建成 年份
1	莲花	黑龙江海林	71.8	22.5	N44°	-45.2	1998
2	柯柯亚	新疆鄯善	41.5	1050	N42°	-32.5	1986
3	小山	吉林抚松	86.3	690	N42°	-40.5	1997
4	松山	吉林抚松	80.8	713.8	N42°	-40.5	2003
5	丰宁	河北丰宁	39.8	1050	N41°	-35.8	2002
6	查龙	西藏那曲	39	4386	N31°	-41.2	1996
7	吉林台一级	新疆尼勒克	157	1427	N43°	-39.9	2006
8	温泉	新疆尼勒克	102	960	N43°	-40	2010
9	龙首二级	甘肃张掖	146.5	1925	N38°	-33	2005
10	黑泉	青海大通	123.5	2894	N36°	-33.1	2001
11	双沟	吉林抚松	110.5	600	N42°	-37.7	2009
12	察汗乌苏	新疆和静	110	2081	N42°	-30	2009
13	蒲石河上库	辽宁宽甸	78.5	395.5	N40°	-38.5	2011
14	下天吉一期	新疆精河	71.5	704	N44°	-34	2001
15	榆树沟	新疆哈密	67.5	1988.5	N42°	-32	2001
16	关门山	辽宁本溪	58.5	375	N41°	-37.9	1998
17	小干沟	青海格尔木	55	3260	N36°	-33.6	1990
18	楚松	西藏白朗	39.67	4190.4	N29°	-27.2	1999
19	纳子峡	青海门源	121.5	3204.6	N37°	-34.1	2014
20	石头峡	青海门源	114.5	3091.3	N37°	-34	2013
21	吉勒布拉克	新疆阿勒泰	140.3	757	N48°	-49	2014
22	蓄集峡	青海海西	121.5	3472.0	N39°	-30	在建

这其中的部分面板坝因建造时间早,设计和施工过程中对高寒问题没有引起足够的重视,国内相关的规范和规程也没有做出重点要求,在运行的过程中出现了严重的冻害、病害。

莲花坝面表层止水结构采用角钢压橡胶板、外包镀锌铁皮的常规止水结构形式。1997 年 6 月电站下闸蓄水,1999 年春季发现水位变动区的部分面

板接缝止水的表面结构遭受破坏,具体表现为:螺栓被拉断,角钢被拉弯,橡胶板被撕断,板接缝部分 SR 填料受损。修复措施为将原橡胶板与面板之间用的面对面直接附设,改为用胶粘剂对面板顶部止水进行密封。

查龙坝在工程运行中发现,水位变动区混凝土面板表面破损情况较为普遍,表面止水也产生一定

程度的破坏。面板混凝土破坏的主要原因是冻融剥蚀所致;而表面止水破坏主要原因是,冬季库水渗入止水结合面后结冰产生冻胀作用,春季气温回升,冰层溶解开化或水库发电库水位下降引起冰拔效应。2009年夏季,采用丙乳砂浆和喷涂聚脲对混凝土面板进行修补,截至目前,维修处理后已经过八个冬季的检验,表明修复效果良好。

松山坝^[1]2001年5月,在清理面板保温材料时发现B14-B17面板底部出现裂缝,裂缝呈网状分布,局部裂缝宽度达20 mm以上;裂缝深度均大于30 cm,局部裂缝贯穿于面板混凝土。面板裂缝主要原因是:预埋在坝体内的两个排水管被结冰封死,垫层料因为低部位的积水在冬季冻结产生冻胀力引起面板破坏。修复措施为在老面板上重浇混凝土面板。

察汗乌苏面板坝面板浇筑30 d后的裂缝条数为711条,分析原因是:①拉面板期间坝址区风速较大,大风天气频繁,空气湿度小,面板表面覆盖的养护草帘等无法固定,混凝土表面蒸发失水干缩严重,引起混凝土面板表面塑性收缩较大形成塑性裂缝。②混凝土浇筑入仓温度较高,造成水化温升较快,并且新疆地区昼夜温差较大、温度突变,混凝土内外温差较大,导致产生温度裂缝。最终对裂缝进行了化学灌浆处理。

柳树沟面板坝吸取了察汗乌苏经验,选择了温和少风季节浇筑、加强流水养护,并掺加罗赛纤维素,共发现裂缝27条。积石峡面板坝为减小水和胶凝材料的用量,面板混凝土出机塌落度为2~4 cm,且选用“祁连山”牌强度等级为42.5 MPa的中热硅酸盐水泥,面板浇筑30 d后的裂缝条数为71条,抗裂效果明显。

北京十三陵抽水蓄能电站上水库,当地最低气温约为-25℃,而每年冻融次数却达到140余次,比东北地区的混凝土冻害更为严重。为此在面板混凝土设计上,采用较高的混凝土强度等级C30F400,

适度增加钢筋含量。

柯柯亚坝主要采取了以下措施以降低严寒的影响:一是适当增大垫层料的渗透系数,采用 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$;二是面板混凝土采用较高的抗冻等级、较低的水灰比;三是面板浇筑之后采用焦油塑料等防水材料将面板涂成黑色。另外,接缝止水上没有外露的螺栓。柯柯亚面板坝的运行和原型观测数据分析表明,上述工程措施是有效的。

综上所述,区别常规面板坝,高寒地区面板坝主要有以下特殊性:垫层料容易发生冻胀破坏,影响面板稳定;面板混凝土的抗冻、防裂问题突出;库区冰盖对面板的破坏效应显著;常规表层止水难以适应冰盖作用力。

3 蓄集峡面板坝的防冻抗裂关键技术

根据工程区的特点,结合高寒地区已建面板坝的工程经验与教训,本工程面板坝做出以下特殊设计:

3.1 垫层料的设计

位于寒冷地区的面板坝,如面板出现裂缝或者止水失效,将产生局部渗流,渗水如不能从垫层料中及时排出,将会形成局部近于饱和的料区,进入冬季结冰期后,局部冻胀会使面板产生不均匀变形,目前已经引起重视,一般采取加粗垫层料粒径、改变级配和提高渗透系数的措施,然而这和通常认为的垫层料作为面板坝第二道渗透防线矛盾^[2-3]。

为兼顾蓄集峡面板坝垫层料保持一定的透水性和防渗性,本工程垫层料小于5 mm的粒径含量控制在25%~45%,小于1 mm的粒径含量控制在15%~25%,可以确保垫层料渗透系数能够达到 $5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。图2给出了蓄集峡面板坝、温和地区面板坝和国际大坝委员会修正的垫层级配曲线。

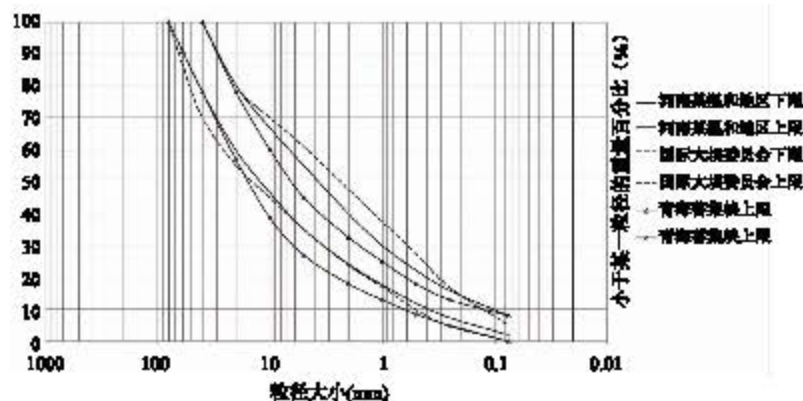


图2 高寒地区、温和地区和国际大坝委员会修正的垫层级配曲线

由图2,蓄集峡垫层料下限已经突破国际大坝委员会推荐的垫层料下包络线,可知,国际大坝推荐的垫层料级配曲线并不能考虑高寒地区垫层料的特殊要求。

3.2 面板混凝土的设计

在我国的高寒地区,往往伴随着高蒸发的气候特征,面板混凝土除了满足抗冻要求外,还需具备抗干缩、冷缩等防裂要求。借鉴查龙、察汗乌苏^[4]和柯柯亚坝的工程经验与教训,蓄集峡面板坝提高了面

板趾板混凝土的抗渗抗冻标号,采用C30、F300、W12。面板混凝土技术指标见表3。

面板厚度按照 $d=0.4+0.0035H$ 确定,厚度为0.4~0.81,为了抗冰冻,较常规面板厚度增加了10 cm,面板最长板长为205 m,配筋采用双层双向结构,纵向钢筋直径从上至下分别采用 $\Phi 14$ 、 $\Phi 16$ 、 $\Phi 18$ 。面板两侧、面板和趾板接触带配“躺U”型加强筋。

表3 蓄集峡水利枢纽大坝面板趾板混凝土技术指标

强度等级	龄期(d)	级配	抗渗等级	抗冻等级	极限拉伸值 ($\times 10^{-6}$)	自生体积变形 ($\times 10^{-6}$) (90 d)	水灰比	粉煤灰掺量 (%)	坍落度 (cm)	保证率 (%)	碱活性	裂缝控制
C30	28	二	W12	F300	≥ 100	≥ 20	≤ 0.45	18~22	3~5	≥ 95	抑制	纤维

大坝面板、趾板位于水库日常水位变化区,水泥选用42.5中热硅酸盐水泥。粉煤灰选用烧失量低、需水量比小的F类I级优质粉煤灰。粗骨料控制各级骨料的超、逊径含量,骨料压碎值不大于10%、针片状含量小于10%、含泥量小于1.0%。结合混

凝土配合比的选择,在混凝土中掺加适量的其他外加剂,如引气剂、减水剂(聚羧酸高性能减水剂)。为减少混凝土面板、趾板的裂缝,在混凝土内掺加单丝型聚丙烯(腈)类纤维,含量不少于 0.9 kg/m^3 混凝土,纤维各项技术参数见表4。

表4 聚丙烯(腈)类纤维各项指标控制标准

比重 (kg/m^3)	每kg纤维 根数(亿)	长度 (mm)	标称直径 (μm)	抗拉强度 (MPa)	最小弹性 模量(GPa)	平均弹性 模量(GPa)	断裂伸 长率(%)	每 m^3 混凝土含 纤维丝(亿)
≥ 1.1	≥ 1.6	≥ 24	≥ 15	≥ 550	> 13.5	≥ 15	< 12	≥ 1

3.3 防冻涂层的设计

西藏查龙水电站,在运行期混凝土面板出现了严重的冰蚀,粗骨料大面积暴露和滚落,究其原因:动冰压力和冻融力是破坏面板混凝土的主要因素。有必要在面板表面涂刷改性沥青、聚脲、水泥基渗透结晶型材料、弹性聚氨酯等憎水隔离层,以使混凝土面板具备一定的抗冰拔能力,可以提高混凝土面板的耐久性和防渗性能。柯柯亚面板堆石坝面板表层涂刷双组分弹性聚氨酯防水黏结材料,显著提高了混凝土的抗冻性能。新疆JLBLK水电站在死水位以上面板表层涂刷弹性聚氨酯,国内在建工程中,西道沟(坝高80.16 m)、西黑沟(坝高44 m)、马拉合(坝高71 m)均在混凝土表面涂刷弹性聚氨酯防水黏结材料,表5给出了蓄集峡拟采用的弹性聚氨酯技术要求。

3.4 表层止水的设计

已建的丰宁水电站、黑龙江莲花坝、吉林小山河、西藏查龙坝、新疆察汗乌苏坝^[5]在早期运行过

程中,进入冬季,水位波动区域的面板顶面表层止水系统不锈钢锚栓被拔出、按压表层盖板的角钢被拉弯,甚至拉断、表层橡胶(不锈钢)盖板遭到撕裂、塑性填料被挤出,整个表层止水系统遭遇全方位破坏。究其原因,冰盖的牵引、拖曳和撞击对面板坝表层止水体系破坏巨大。

表5 蓄集峡面板坝弹性聚氨酯的技术指标

序号	项目	技术指标
1	拉伸强度(MPa)	≥ 10.0
2	断裂伸长率(%)	≥ 400
3	低温弯折性($^{\circ}\text{C}$)	≤ -40
4	不透水性	不透水 2.0 MPa/24 h
5	粘结强度(MPa)	干燥粘结 ≥ 4.0
		潮湿面粘结 ≥ 2.3
6	抗冰拔性(粘结力)(MPa)	≤ 0.01
7	固体含量(%)	≥ 98
8	表干时间(h)	≤ 8
9	实干时间(h)	≤ 24
10	耐久性 辐照 1500(MJ/m^2), 720(h)	30 a
11	有无毒性	无毒

为此,蓄集峡面板坝将表层止水做出如下改进:将角钢换成扁钢、采用下沉式螺栓、螺栓直径(10 mm)小于混凝土的钻孔直径(14 mm),目的是保证螺栓周围可以填充 HK98 化学锚固剂;面板表层先扣 3 cm 矩形槽,在此基础上,下扣 10 cm 的梯形

槽,保证表层止水的塑性填料充分下沉,减小鼓包表面积延长表层盖板的长度,只保证鼓包露出面板表面 2 cm,图 3 给出了高寒地区蓄集峡面板坝表层止水基本结构。

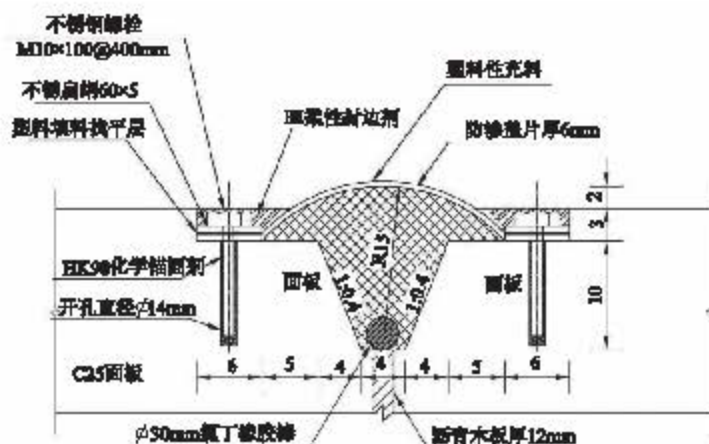


图3 蓄集峡面板坝表层止水基本结构

3.5 冬季施工技术

通常情况下,负温施工时,建基面和各种坝料内不应有冻块存在,负温下填筑时不得加水。蓄集峡工地在每年 11 月份进入冰冻期,根据施工进度计划,12 月底填筑停工,进入冬歇,因此每年有 1~2 个月无法进行洒水碾压。为此,垫层料和过渡料减薄碾压厚度至 30 cm,主堆石料和下游堆石料减薄碾压厚度至 60 cm,增加碾压遍数至动碾 10 遍达到设计要求的压实标准。在气温稳定升至 0℃ 以上时,对前期未加水碾压的已经被覆盖到下部的仓面,采用多级离心清水泵 $\leq 43 \text{ m}^3/\text{h}$ - 150 m 浸水、补水,加水量不少于 5 倍未加水碾压仓面体积,使下部坝体充分泡水,废水经由上下游基坑抽排至围堰外侧。

4 总结

(1)总结了国内典型高寒地区面板坝成功经验和教训,区别常规面板坝,高寒地区面板坝主要有以下特殊性:垫层料容易发生冻胀破坏,影响面板稳定;面板混凝土的抗冻、防裂问题突出;库区冰盖对面板的破坏效应显著;常规表层止水难适应冰盖作用力。

(2)蓄集峡面板坝通过限定小于 5 mm、1 mm

粒径的颗分组成,给出了匹配垫层料排水、防渗双重功能的级配曲线。

(3)蓄集峡面板坝通过加厚面板,提高混凝土强度、抗冻指标,配合比设计中采取了减少水化热温升的措施及掺加防裂材料,全面提高面板抗冰冻防裂缝性能。

(4)蓄集峡面板坝冬季施工措施,通过减薄碾压层厚,增加碾压遍数,暖季坝面补水措施,达到了压实标准,使用下沉式止水减小了和冰面的接触面积,提高了抗冰冻性能。

参考文献

- [1] 关志敏,杨辉,王常义.寒冷地区混凝土面板堆石坝设计[J].水利水电技术,1993,12.
- [2] 党连文.寒冷地区混凝土面板堆石坝垫层的设计[J].水利水电技术,1995,4.
- [3] 邓铭江,严寒,高震,深覆盖层混凝土面板坝关键技术研究综述[J].岩土工程学报,2012,6(6):985-996.
- [4] 周建平,杨泽艳,张宗亮,等.中国混凝土面板堆石坝30年[M].北京:中国水利水电出版社,2016.
- [5] 赵庆,苗喆,李学强.高寒、高蒸发地区面板坝钢筋混凝土面板防裂抗裂技术探讨[J].西北水电,2014,4,29-32.