

碾压式砂砾石沥青心墙坝施工关键技术研究

王建军 赵继成

新疆塔里木河流域奴尔水利枢纽工程建设管理局, 新疆库尔勒 841000

中国水电建设集团十五工程局有限公司科研设计院, 陕西咸阳 712000

[摘要] 新疆策勒县奴尔水利枢纽工程是一个最大坝高80m的碾压式沥青混凝土心墙坝。施工中遇到了酸性骨料、要在冬季低温、风沙气候施工等技术难题。经过精心的科研试验和慎重的技术论证, 采取了科学、可靠的技术措施, 成功的解决了这些技术难题, 顺利的完成了坝体工程的施工任务。通过施工效果评价, 新疆策勒县奴尔水利枢纽工程沥青心墙坝施工工艺及技术创新在本工程建设中发挥了重要的指导作用, 对类似骨料及气候条件下的碾压式沥青混凝土心墙施工, 具有很好的推广价值和借鉴参考价值, 对推动我国沥青混凝土心墙坝筑坝施工技术的领域扩展起到积极作用。

[关键词] 碾压式; 砂砾石; 沥青混凝土; 心墙; 施工关键技术

1 工程概况和技术问题

1.1 工程概况

奴尔河位于昆仑山北坡中段, 多年平均年径流量 1.7 亿 m^3 。新疆策勒县奴尔水利枢纽工程(以下简称: 奴尔水利枢纽工程)位于奴尔河中下游河段, 属新疆维吾尔自治区和田地区策勒县境内的奴尔河控制性工程, 是一项以灌溉、防洪为主, 兼顾水力发电的综合性水利工程。

水库正常蓄水位 2497.0m, 水库总库容 0.69 亿 m^3 , 拦河坝坝高 80.0m, 电站总装机容量 6.2MW, 发电引水流量 $11.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 多年平均发电量 $0.21 \text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$ 。

碾压式沥青混凝土心墙为垂直式, 心墙轴线位于坝轴线上游 2.0 m, 顶宽 0.5m, 底宽 0.9m, 顶部高程 2495.50m, 最大断面底部高程为 2422.3m。心墙上下游两侧各设厚 3m 的过渡层。在坝基设心墙混凝土基座。坝基和坝肩防渗线总长约 745.0m。

坝基防渗为混凝土防渗墙加基础帷幕灌浆, 防渗墙最大深度 31m, 厚度 0.8m。坝体总填筑量 728 万 m^3 , 沥青混凝土心墙总填筑量 3.38 万 m^3 , 混凝土防渗墙面积 1.31 万 m^2 。

沥青混凝土心墙是坝体的主要防渗结构。沥青混凝土心墙位于坝体中部, 坝轴线上游 2.0m。沥青混凝土心墙的厚度由底部沥青心墙混凝土基座最大 2.1m 厚渐变梯形至 0.9m, 在 2448.5m, 2473.5m 高程分别台阶式渐变至 0.7m、0.5m 厚度。心墙顶与防浪墙底连接, 心墙顶高程为 2498.50m, 心墙底部与混凝土基座连接。奴尔河山区历年极端最高气温 36.4°C , 极端最低气温 -22.5°C , 多年平均气温 4.7°C , 最冷月平均气温 -5.3°C , 多年平均年降水量 195mm, 多年平均年蒸发量 1267.4mm。

心墙基座采用钢筋混凝土结构, 布置在心墙底部, 沥青混凝土心墙与基座间铺设一层沥青马蹄脂厚 1cm, 心墙于混凝土基座之间采用铜片止水, 沿心墙轴线布置。心墙上、下游侧分别设 3m 厚的砂砾石过渡层, 作为沥青混凝土心墙的持力层和保护层。沥青混凝土心墙与坝基的连接结构如图 1-1。

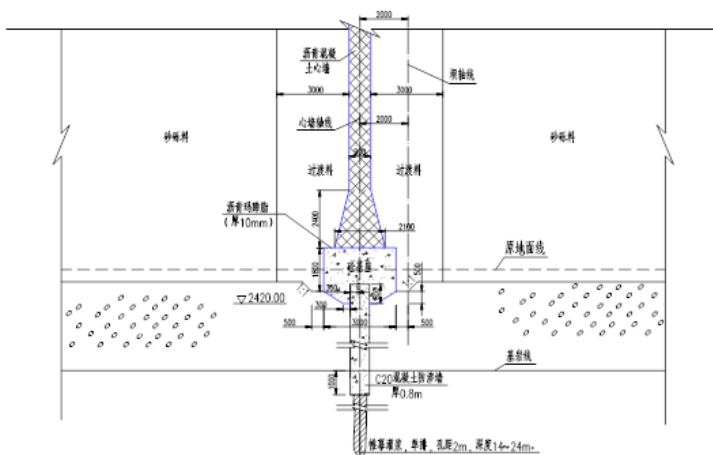


图 1-1 沥青混凝土心墙与基座连接图

沥青混凝土心墙铺筑采用专用的沥青心墙摊铺机机械化施工,摊铺机无法施工的接触部位(沥青混凝土心墙与混凝土基座)及两岸接头部位,采用立模、人工摊铺施工。心墙及心墙相邻1m过渡料均由沥青心墙专用摊铺机进行摊铺,过渡料由20t自卸车运输,1.2m³挖掘机入仓。沥青混凝土拌和采用LB-1000拌制,8t自卸汽车运输至现场,经改制后的3m³装载机给摊铺机供料、人工配合直接入仓。下层沥青混凝土混合料由摊铺机自带的红外线加热器加热,对于摊铺机加热不到的地方,用红外线加热器加热至70℃。

沥青混凝土最大摊铺宽度为1.2m,摊铺厚度30cm,压实厚度28cm左右;岸坡段连接部位人工摊铺,模板采用钢模板,摊铺压实厚度28~30cm。

1.2 技术问题

奴尔水利枢纽工程坝体心墙沥青混凝土骨料根据工程实际情况只能就地选用酸性的砂砾石骨料;工期的要求也要在冬季寒风沙季节施工。这些客观的条件都与常规沥青混凝土适宜的碱性骨料、破碎石骨料、5℃以上温度的气温施工的技术要求不一致。要保证工程质量和工期,必须进行精心细致试验研究工作,利用可靠的技术创新的成果,弥补客观条件和环境的不足。

2 针对酸性、砂砾石骨料的沥青混凝土配合比试验研究及现场沥青配合比验证试验

2.1 沥青混凝土材料及配合比试验研究

2.1.2 试验研究的思路和思路

(1) 通过对心墙沥青混凝土拟用原材料(沥青、天然砂砾石、填料)的品质检测试验,确定符合奴尔水利枢纽工程沥青混凝土心墙坝工程技术要求的原材料。

(2) 研究抗剥落剂对酸性骨料与沥青黏附性的影响,优选抗剥落剂品种及其最优掺量。采用抗剥落剂增强酸性骨料与沥青的黏附力。

(3) 在优选抗剥落剂品种的基础上,研究全部采用破碎天然砂砾石料、采用88%破碎天然砂砾石料的沥青混凝土最大理论密度、容重、孔隙率及水稳定性性能,确定采用天然砂砾石料沥青混凝土的级配指数、沥青含量、填料用量、抗剥落剂掺量等配合比参数,提出奴尔水利枢纽工程天然砂砾石料沥青混凝土初步推荐配合比。

(4) 根据提出的初步推荐配合比,研究天然砂砾石料沥青混凝土的力学及渗透性能,提出奴尔水利枢纽工程天然砂砾石料沥青混凝土优选配合比方案。

(5) 在优选天然砂砾石料沥青混凝土配合比试验成果基础上,进行天然砂砾石料沥青混凝土静、动力工程特性试验,提出天然砂砾石料沥青混凝土的配合比等材料参数指标,为数值计算分析提供必要的参数。

(6) 优选出2组适合新疆奴尔水利枢纽工程的沥青混凝土配合比,并进行了沥青混凝土的水稳定性、间接拉伸、小梁弯曲、单轴压缩、渗透、静三轴、动三轴及耐久性试验,以论证砂砾石料用于奴尔水利枢纽工程沥青混凝土心墙的可行性,为设计与施工提供技术支持。

(7) 开展天然砂砾石料沥青混凝土的长期耐久性能研究。采用长期浸水试验,研究天然砂砾石料对沥青混凝土水稳定性和劈裂性能的影响,并与人工灰岩骨料进行对比;采用长期冻融循环试验,研究天然砂砾石料沥青混凝土在冻融循环作用下的物理力学性能和微观结构的演变规律。

(8) 研究不同孔隙率条件下,天然砂砾石料沥青混凝土的力学性能、渗透性能,以及长期耐久性能,提出奴尔水利枢纽工程天然砂砾石料沥青混凝土施工质量控制技术要求。

2.1.3 试验研究成果

(1) 各种原材料主要技术指标及检测结果见表2-1~表2-7。

表 2-1 沥青质量技术指标检测结果

检测项目	针入度 (0.1mm)	软化点 (℃)	延度 (cm)		旋转薄膜加热试验			
			15℃	10℃	质量变化 (%)	残留针入度比 (%)	残留延度 (cm)	
							15℃	10℃
技术要求	80~100	不小于45℃	不小于100	不小于45	±0.8	不小于57	≥100	≥8
检测结果	86	50.0	100	100	-0.11	60	>100	>100
备注	中国石化塔河炼化有限责任公司生产(简称库车沥青)东海牌90号沥青。							

表 2-2 矿粉(填料)质量技术指标检测结果

检测项目	技术要求	检测结果
表观密度 (g/cm ³)	≥2.50	2.69
亲水系数	≤1.0	0.71
含水率 (%)	≤0.5	0.2
颗粒级配 通过率 (%)	0.6	100
	0.15	99.9
	0.075	86.9

表 2-3 粗骨料质量技术指标检测结果

检测项目	技术要求	4种级配检测结果
表观密度 (g/cm ³)	≥2.6	2.68~2.78
针片状颗粒含量 (%)	≤25	2.0

压碎值 (%)	≤30	14.2
吸水率 (%)	≤2	0.4~0.6
坚固性 (硫酸钠) %	≤12	3.0~4.8
含泥量 (%)	≤0.5	0.2~0.3
粘附性 (级)	≥4	4级

表 2-4 细骨料质量技术指标检测结果

检测项目	技术要求	检测结果
表观密度 (g/cm³)	≥2.55	2.66
吸水率 (%)	<3 (DL/T5363-2006)	1.3
含泥量 (%)	≤2	0.4
耐久性 (坚固性) %	≤15	2.1
水稳定等级 (级)	≥6	9级

表 2-5 抗剥落剂质量技术指标检测结果

检测项目	技术要求 (SL501-2010)	检测结果	试验方法
沥青与粗集料粘附性	≥4级	4级	水煮法

(2) 奴尔天然砂砾石的原料岩石种类繁多,形成的原因也比较复杂,可能含有某些不稳定的化学物质或者有害成分。试验根据天然骨料样品的颜色和纹理,将天然骨料的种类大致划分为6大类,对每一类别选取1至2块具有代表性的岩石,分别进行了岩石矿料鉴定。天然(破碎)砂砾石粗骨料岩矿鉴定结果,奴尔水利枢纽沥青混凝土心墙拟用天然砂砾石的原岩品种比较复杂,既含有偏碱性的岩石类(细粒石灰岩),也含有偏酸性的岩石类(花岗岩、石英砂岩等)。本次试验用天然骨料样品,偏酸性骨料居多。

(3) 抗剥落剂对比试验。为了提高沥青与酸性骨料的粘附性,目前国内外通常采用在沥青中添加抗剥落剂的方式。当前国内使用的聚合物抗剥落剂主要有胺类与非胺类抗剥落剂。以胺类居多,但是胺类物质受热易分解,稳定性相对较差,其抗剥落剂的耐热性与长期性能备受质疑。非胺基类抗剥落剂的主要成分是一种表面活性剂,其特点是热稳定性和耐久性较好,抗剥落剂分解温度高达180℃以上。适合于各种石料(碱性或酸性)化学碱不发生破坏,水稳定性好。

试验为提高酸性骨料与沥青的粘附性,通过调研,优选了匀强®-EASA100 沥青抗剥落剂(非胺类),XT-2 型沥青抗剥落剂(非胺类)以及CW-1 型沥青抗剥落剂(非胺类),进行比选试验。

(4) 粗骨料与沥青的粘附性试验。试验用粗骨料为坝址下游河漫滩C2料场开采的天然砂砾石料冲洗干净后,经破碎并筛分而成。天然砂砾石的原料岩石种类繁多,即含有偏酸性的岩石(石英砂岩、花岗岩等),也含有偏碱性的岩石(细粒石灰岩)。本次试验,为比较三种不同品牌抗剥落剂的性能,根据天然砂砾石样品的颜色和纹理,从砂砾石样品中挑选了3种具有代表性的酸性骨料进行试验,试验结果见表2-6,天然砂砾石破碎粗骨料与沥青黏附性试验见图2-1~图2-2。

(5) 试验结果表明:①不掺抗剥落剂,天然砂砾石中的酸性骨料与沥青的黏附性等级为3级或4级;② 沥青中掺入适当的抗剥落剂,能明显提高酸性骨料与沥青的黏附性。从图2-2可以明显的看出,沥青中掺入抗剥落剂,在沸水中浸煮3min后,沥青膜完全保存,剥离面积百分率小于10%,黏结力等级达到5级或4级;③三种不同品牌的非胺类抗剥落剂均能有效地提高酸性骨料与沥青的黏附性,使酸性骨料黏结力等级达到5级或4级。

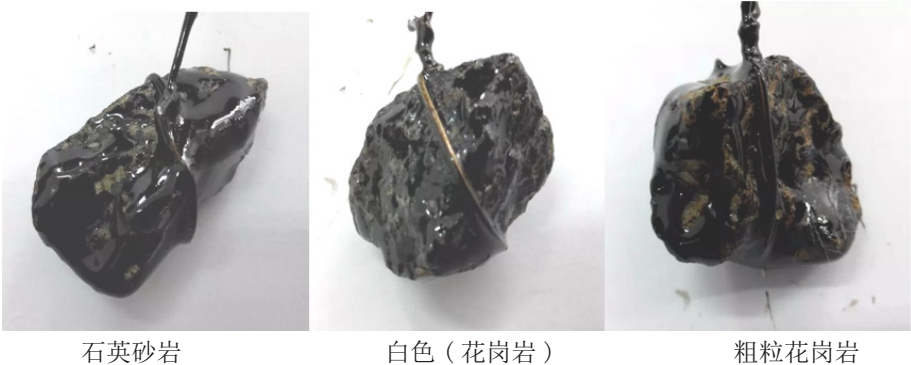


图 2-1 天然砂砾石破碎粗骨料与沥青黏附性试验结果(未添加抗剥落剂)

表 2-6 天然(破碎)砂砾石粗骨料与沥青的黏附性试验结果

试验编号	砂砾石原石种类	抗剥落剂品牌	抗剥落剂掺量 (%)	黏结力等级	备注
NL-0	1# 石英砂岩	—	0.0	4	见图2-2
	2# 白色白岗岩(花岗岩)			4	
	3# 粗粒花岗岩			3	

NL-1	1 [#] 石英砂岩	匀强 ®-EASA100	0.3	5	见图2-3
	2 [#] 白色白岗岩(花岗岩)			5	
	3 [#] 粗粒花岗岩			5	
NL-2	1 [#] 石英砂岩	XT-2	0.3	5	
	2 [#] 白色白岗岩(花岗岩)			4	
	3 [#] 粗粒花岗岩			4	
NL-3	1 [#] 石英砂岩	CW-1	0.3	5	
	2 [#] 白色白岗岩(花岗岩)			5	
	3 [#] 粗粒花岗岩			4	



图 2-2 天然砂砾石破碎粗骨料与沥青黏附性试验结果（添加抗剥落剂）

（6）水稳定性试验。试验结果表明：

1）沥青混凝土中添加适当的抗剥离剂，能有效提高沥青混凝土的水稳定系数。

2）匀强®-EASA100 沥青抗剥落剂（非胺类）质量最为稳定，在推荐掺量范围内，随着掺量的增加，沥青混凝土的水稳定性呈增加趋势。

（7）比选结果。三种不同品牌抗剥落剂配制的沥青混凝土水稳定系数均大于 0.90，满足 SL 501—2010 抗剥落剂《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》的相关技术要求。最终综合考虑选择匀强®-EASA100 沥青抗剥落剂为本次试验用抗剥落剂，初期掺量为 0.3%。见表 2-7。

表 2-7 抗剥落剂（不同品牌和掺量）对沥青混凝土水稳定系数影响试验结果

编号	抗剥落剂 品 牌	配合比主要参数				水 稳 定 系数K _w
		级配指数r	沥 青 含 量 B (%)	填 料 用 量 F (%)	抗剥落剂掺量 (%)	
NTB0	—	0.39	6.7	12.0	0.0	0.86
NTB1-1	EASA100	0.39	6.7	12.0	0.1	0.94
NTB1-2		0.39	6.7	12.0	0.3	0.99
NTB1-3		0.39	6.7	12.0	0.5	1.04
NTB2-1	XT-2	0.39	6.7	12.0	0.1	1.04
NTB2-2		0.39	6.7	12.0	0.3	0.94
NTB2-3		0.39	6.7	12.0	0.5	1.01
NTB3-1	CW-1	0.39	6.7	12.0	0.1	0.97
NTB3-2		0.39	6.7	12.0	0.3	0.93
NTB3-3		0.39	6.7	12.0	0.5	0.94

2.1.4 试验研究结论

（1）克拉玛依 90 号沥青、库车 90 号沥青均满足 SL 501—2010《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》中沥青的技术要求，可用于奴尔沥青混凝土心墙工程；坝址下游河漫滩 C2 料场开采的天然砂砾石料，冲洗、破碎筛分后，呈酸性。质地坚硬，坚固性较好，与沥青的粘附性达到 4 级，质量满足 SL501—2010 规范中粗骨料的质量要求；匀强○R-EASA100 沥青抗剥落剂（非胺类），能有效提高砂砾石粗骨料与沥青黏附性以及砂砾石沥青混凝土的水稳定性。

（2）沥青混凝土配合比设计及性能试验结果。库车 90 号沥青、克拉玛依 90 号沥青推荐配合比见表 2-9。推荐的沥青混凝土配合比的各项性能能够满足沥青混凝土心墙的相关技术要求。

（3）优选的两种配合比制备的沥青混凝土试样均具有较高的强度和模量。天然砂砾石料沥青混凝土配合比具有更好的塑性，适应变形的能力优于人工灰岩骨料沥青混凝土。

（4）天然砂砾石沥青混凝土耐久性试验结果表明，砂砾石沥青混凝土中添加适当的抗剥落剂，能有效的提高沥青混凝土的抗水侵蚀能力和抗冻融能力。

表 2-8 奴尔大坝心墙沥青混凝土推荐配合比

骨料 品种	沥青品种	级配 指数 r	沥青含B 量(油 石比)%		填料 用料F (%)	抗剥 落剂 (%)	各级矿料质量百分比(%)					
							13.2~ 19mm	9.5~ 13.2mm	4.75~ 9.5mm	2.26~ 4.75mm	0.075~ 2.36mm	<0.075 mm
砾石 (100% 碎石)	库车90号	0.39	6.7 (7.1)		12	0.3	14.2	10.2	17.9	14.2	31.1	矿粉 12.4
	克拉玛依 90号	0.39	6.7 (7.1)		12	0.3	14.2	10.2	17.9	14.2	31.1	12.4

2.2 现场验证试验

为了确保工程施工质量，在专题试验研究的基础上，在工程施工现场进行验证复核试验，为现场铺筑试验提供基准配合比，并最终用于生产性试验施工配合比。

2.2.1 试验内容

- (1) 原材料的检验，包括人工破碎骨料、矿粉、沥青、抗剥落剂等。
- (2) 选择库车 90 号沥青进行沥青配合比验证试验，通过一系列沥青混凝土性能试验，确定符合设计规范要求且经济合理的沥青混凝土最佳施工配合比。
- (3) 现场冷骨料进行室内合成级配见表 2-9，冷骨料合成级配曲线见图 2-3。

表 2-9 冷骨料合成级配试验成果

规格 粒径	1#冷料 0~2.36mm	2#冷料 2.36~4.75mm	3#冷料 4.75~9.5mm	4#冷料 9.5~13.2mm	5#冷料 13.2~19mm	矿粉	合成 级配	设计 级配
26.5mm	100	100	100	100	100	100	100	100
19mm	100	100	100	99.8	97.1	100	99.5	100
16mm	100	100	100	99.5	69.5	100	95.1	93.5
13.2mm	100	100	100	97.8	23.2	100	87.4	86.8
9.5mm	100	100	99.0	25.8	1.6	100	74.5	76.4
4.75mm	99.9	98.2	10.4	0.7	0.1	100	57.4	58.5
2.36mm	98.2	26.9	0.3	0.1	0.1	100	44.6	44.6
1.18mm	77.2	9.1	0.2	0.1	0.1	100	35.6	34.2
0.6mm	46.7	3.6	0.2	0.1	0.1	100	25.6	26.4
0.3mm	25.3	2.0	0.2	0.1	0.1	100	18.9	20.2
0.15mm	13.6	1.5	0.1	0.1	0.1	99.8	15.3	15.6
0.075mm	5.7	1.0	0.1	0.1	0.0	91.6	12.0	12.0
掺配比例(%)	30	15	15	13	16	11	—	—

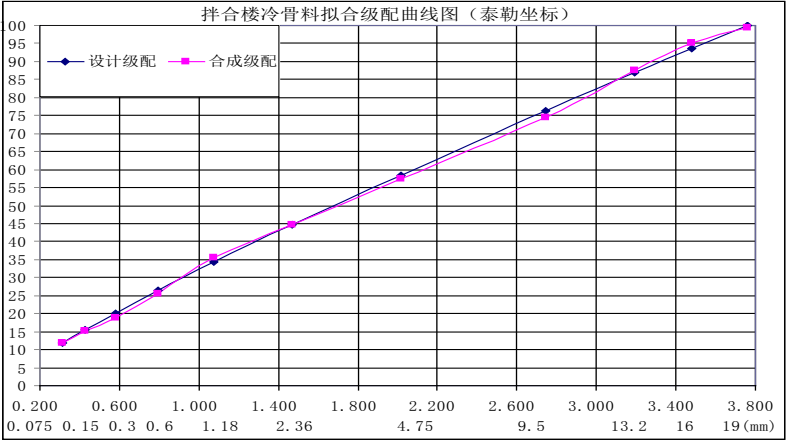


图 2-3 冷骨料合成级配曲线图

- (4) 工地试验室马歇尔试验验证结果均满足设计要求，见表 2-10。

表 2-10 库车 90 号沥青混凝土配合比工地现场室内马歇尔试验结果

沥青含量 (%)	试件密度 (g/cm ³)	理论最大密度 (g/cm ³)	孔隙率 (%)	稳定度 (N)	流值 (0.1mm)
6.4	2.443	2.454	0.46	6120	81.5
6.7	2.430	2.447	0.70	6628	90.2
7.0	2.422	2.437	0.62	5293	102.1
设计要求	>2.35	—	≤2	>5000	30~110

- (5) 施工现场拌和楼试拌，取混合料进行马歇尔试验，见表 2-11，见图 2-4。

表 2-11 拌和楼试拌马歇尔试验成果

检测指标		沥青含量 (%)		试件密度 (g/cm ³)		理论最大密度 (g/cm ³)		孔隙率 (%)		稳定度 (N)		流值 (0.1mm)	
		6.7		2.432		2.444		0.49		6079		84.0	
设计要求		±0.3		>2.35		—		≤2		>5000		30~110	
矿料级配	筛孔 (mm)	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
	通过率 (%)	100	98.3	92.8	86.2	77.3	60.7	41.9	34.5	26.1	18.0	14.3	12.2
设计级配		100	100	93.5	86.8	76.4	58.5	44.6	34.2	26.4	20.2	15.6	12.0
级配偏差 (%)		0	-1.7	-0.7	-0.6	0.9	2.2	-2.7	0.3	-0.3	-2.2	-1.3	0.2
允许偏差范围		±5	±5	±5	±5	±5	±5	±4	±4	±4	±4	±4	±2

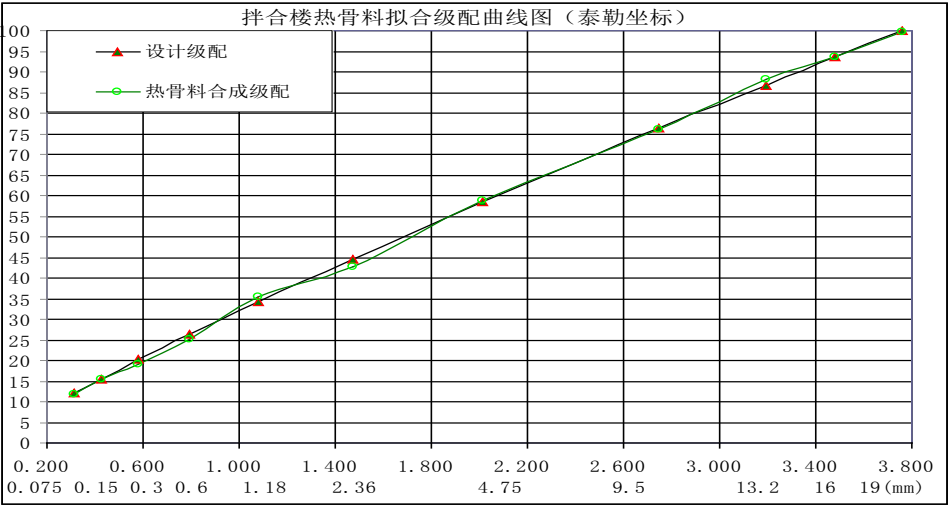


图 2-4 热料拟合级配（“▲”代表设计级配，“●”代表拟合级配）
 （6）推荐施工配合比及骨料设计级配及拟合级配曲线（见表 2-12、表 2-13）。

表 2-12 心墙沥青混凝土生产配合比推荐

材料名称	C2料场100%破碎骨料 (%)					矿粉 (%)	沥青含量 (%)	抗剥落剂 (%)
	5#热料	4#热料	3#热料	2#热料	1#热料			
规格	13.2~19mm	9.5~13.2mm	4.75~9.5mm	2.26~4.75mm	0~2.36mm	<0.075mm	90号道路石油沥青A级	SA-100
组成比例	13	14	16	15	33	9	6.7	0.3
备注	沥青为库车东海牌石油90号沥青；抗剥落剂为江苏苏博特；矿粉为新疆洛浦县金石矿粉。							

表 2-13 骨料设计级配及拟合级配曲线

粒径 (mm)	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率设计 (%)	100	93.5	86.8	76.4	58.5	44.6	34.2	26.4	20.2	15.6	12.0
通过率热料 (%)	99.0	93.6	88.1	76.1	58.8	42.6	35.6	25.3	19.2	15.6	11.8
通过率冷料 (%)	99.5	95.1	87.4	74.5	57.4	44.6	35.6	25.6	18.0	15.3	12.0

2.3 现场验证试验发现的问题及解决方法

2.3.1 天然砂砾石料破碎筛分而成的小于 0.075mm 矿粉，经检测呈酸性，验证试验现场采取细骨料单炒等措施进行石粉分离处理工艺后，热料仓检测热骨料拟合级配筛分试验后酸性 0.075mm 石粉含量仍然有超过 2% 的情况。

2.3.2 针对这一问题进行了补充试验研究，采用部分酸性矿粉进行了可行性试验研究论证。将 0.075mm 酸性填料掺量从 1% 增加到 6%，提高掺抗剥离剂掺量，进行沥青混凝土的力学强度值（劈裂、拉伸、弯曲、单轴抗压及三轴抗剪）、应变值（间接拉伸、直接拉伸、弯拉）及渗透性能变化幅度等试验研究论证。通过论证，说明酸性填料掺量在一定范围内变化，对沥青混凝土的强度、变型及渗透性能、耐久等性能影响与碱性灰岩骨料沥青混凝土基本一致结论。

2.3.3 根据补充试验结果，确定将酸性 0.075mm 石粉含量控制在不大于 3%，沥青抗剥离剂推荐掺量 0.5% 这个标准。

2.4 心墙沥青混凝土及砂砾石过渡料碾压试验验证

2.4.1 试验的目的。沥青混凝土现场铺筑碾压试验是对室内沥青混凝土配合比进行验证，通过对沥青混凝土原材料制备、储存、拌和、以及各种施工机械的类型、运输性能与生产能力匹配情况、铺筑碾压及质量检测等一套施工工艺流程的演练，结合过渡料摊铺及碾压试验，取得并确定沥青混凝土心墙施工工艺参数，用以指导沥青混凝土心墙的实际施工。此外，结合气候和运输条件，确定施工工艺参数：铺料层厚度、碾压方式及遍数，施工时碾压适宜温度控制范围，特别是低气温、风沙天气等情况下，保证施工质量的施工工艺和技术措施。

2.4.2 施工工艺流程主要包括铺筑前的准备、烘炒分级、沥青混合料拌制、沥青混合料运输、沥青混合料和过渡料

摊铺、沥青混合料和过渡料碾压、层间和接缝处理、质量检测等几个主要阶段。其具体施工工序为：施工准备→浇筑基础混凝土、层面清理、验收测量放线、定位→铺筑冷底子油→铺筑沥青砂马蹄子→沥青混合料和过渡料卸入摊铺机→摊铺机摊铺沥青混合料→过渡料反铲补填→过渡料和沥青混合料分别碾压。

2.4.3 施工参数选择试验结果

(1) 现场铺筑试验段长 30m，平段全部采用机械摊铺，斜坡面采用人工摊铺，同一铺筑层厚度 30cm，碾压试验时气温为 17℃，沥青混合料出机口温度大于 150℃ 小于 165℃，入仓温度大于 145℃ 小于 160℃，初碾温度 130℃～150℃，终碾温度不低于 110℃，摊铺第二层时设置了一处斜坡冷接缝。

(2) 从试验结果分析，三个碾压区芯样试件孔隙率全部满足设计要求（现场<3%），综合考虑选择 10 遍区碾压参数作为大坝心墙沥青混凝土施工时碾压参数。接缝处渗透检验，芯样密度、孔隙率检测结果均符合设计要求，经对芯样仔细观察，沥青混凝土层间结合良好，与水泥混凝土面粘接紧密，未发现有明显接缝和不密实现象，说明所采取的层间和接缝处理施工工艺是可行的。

(3) 对拌制沥青混合料质量和现场钻取芯样进行了试验检测，试验结果见表 2-14 所示。

(4) 根据试验结果确定的沥青混凝土心墙配合比见表 2-15。

2.5 试验论证结果

2.5.1 通过检测、试验、对比、分析、验证等研究，在采取措施的情况下，酸性骨料、砂砾石骨料和酸性填料生产的沥青混凝土各项技术指标满足设计和规范要求。

2.5.2 通过铺填碾压工艺试验验证，酸性骨料、砂砾石骨料和酸性填料生产的沥青混凝土能满足坝体心墙填筑施工的施工性能要求。

表 2-14 拌和楼拌制沥青混合料试验检测结果

检测项目			单位				设计要求				检测结果			
试件密度			g/cm ³				≥2.35				2.419			
孔隙率			%				≤2				1.1			
理论最大密度			g/cm ³				实测值				2.447			
稳定度			N				>5000				6808			
流值			0.1mm				30~110				84.8			
水稳定系数			%				≥0.9				0.92			
渗透系数			(cm/s)				<1×10 ⁻⁸				未见渗透			
油石比			%				设计值7.1±0.3				7.15			
矿料级配	筛孔(mm)	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
	通过率 (%)	100	98.2	92.9	85.6	78.1	60.4	43.1	33.8	26.1	19.1	14.9	12.0	
	设计级配 (%)	100	100	93.5	86.8	76.4	58.5	44.6	34.2	26.4	20.2	15.6	12.0	
	偏差值 (%)	0	-1.8	-0.6	-1.2	1.7	1.9	-1.5	-0.4	-0.3	-1.1	-0.7	0	
	规范要求 (%)	±5	±5	±5	±5	±5	±5	±4	±4	±4	±4	±4	±2	

表 2-15 奴尔大坝心墙心墙沥青混凝土生产配合比推荐（组成比例）

骨料品种	沥青品种	级配指数 _r	沥青含油量（油石比）%	填料用量 F（%）	抗剥落剂（%）	各级矿料质量百分比（%）					
						13.2～19mm	9.5～13.2mm	4.75～9.5mm	2.26～4.75mm	0.075～2.36mm	<0.075mm
砾石（100%碎石）	库车90号	0.39	6.7	9+3	0.5	13	14	16	15	30	矿粉 12（含天然石粉3）
备注	1. 沥青为库车东海牌石油90号A级沥青；抗剥落剂为江苏苏博特；矿粉为新疆洛浦县金石矿粉； 2. 施工中应保持骨料小于0.075mm颗粒占矿料总质量小于3%； 3. 施工中根据骨料中小于0.075mm颗粒含量对矿粉进行适当调整。										

3 低温、风沙天气环境施工技术

常温条件下碾压式沥青混凝土防渗心墙施工的技术目前已趋于成熟，但在寒冷地区土石坝碾压式沥青混凝土防渗心墙冬季施工技术方面在本领域内仍属于探索阶段。在 0℃～-15℃ 的低温及沙尘天气条件下碾压式沥青混凝土的施工技术，奴尔水利枢纽工程沥青混凝土心墙坝建设中进行了深入的研究并成功应用。经现场试验研究，在沥青混凝土原材料、配合比、加温拌和设备等方面采取以下几个方面的技术和措施，能保证低温、风沙天气环境下的沥青混凝土施工质量：

3.1 低温施工沥青混凝土拌和

3.1.1 对沥青混凝土原材料进行保温防护的同时,适当提高沥青含量 0.3% 作为冬季施工配合比。

3.1.2 对拌和系统进行保护,在沥青混合料拌和站增设辅助加热、保温设备。拌和楼热骨料提升机、热料仓和混合料搅拌锅均增设一层矿棉保温层,沥青输送管路增加蒸汽护套保证其畅通,尽量降低搅拌系统的温度损失。通过以上措施,运输过程中的温度损失减少了 3℃。

3.1.3 根据当时施工现场环境温度,适当提高沥青混合料拌和温度:骨料加热控制在 180~190℃;沥青加热控制在 160~170℃;气温偏低时取上限。混合料出机口温度一般控制在 165~175℃;经过水平运输、摊铺机摊铺时的温度损失,要求混凝土入仓温度达到 146~166℃,满足低温季节沥青混凝土施工的碾压温度要求。

3.1.4 沥青的熔化、脱水温度不宜过高,宜控制在 120℃左右,严格将沥青的加热、保温温度控制在 150℃~160℃范围内,保温时间不超过 48h。

3.1.5 将矿料的加热温度控制在 170℃~190℃。

3.1.6 施工中采用的温度控制范围通过现场摊铺、碾压等情况适当调整。

3.2 低温施工沥青混凝土心墙的施工技术和措施

3.2.1 严格执行碾压式沥青混凝土低温施工试验时推荐的沥青混合料的出机温度和入仓温度,严格控制碾压温度。

3.2.2 沥青混凝土施工设备夜间应存放在封闭式的停车棚内,避免夜间受冻,确保继续铺筑时能够顺利启动;

3.2.3 加强施工现场的组织、协调、管理工作,沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压各工序紧密衔接,缩短工序作业时间。沥青混合料从出机到碾压完毕所用时间不超过 30 分钟。

3.2.4 缩短碾压段,按 15m 左右为一个碾压单元,摊铺后及时碾压;碾压设备数量配置相对富裕。

3.2.5 心墙专用摊铺机前增加一组红外线加热板(或丙烷燃烧器)并适当降低摊铺机行进速度,保证心墙结合层面温度达到规范要求。

3.2.6 根据 2015 年 12 月温度统计情况,12 月最低气温 -23℃,最高气温 3℃,针对此情况确定冬季施工条件为 -10℃以上采用保温措施施工,低于 -10℃时停止沥青混凝土施工,现场采用棉被及电热毯保温。

3.3 沥青混凝土心墙冬季停工越冬保护措施

在冬季停工后,为了防止沥青混凝土在低温下遭到冻害,应用沙土埋藏保温,奴尔坝体填埋深度正面和侧面均 100cm,大于冻土深度 20cm。由下至上为帆布、电热毯、棉被、过渡料。整个越冬期,由值班人员每天对沥青混凝土心墙进行温度测量,测量采用插入式电子温度计,位置数量采用 50~100m 布置一个,根据测量结果整理出外界温度及内部温度的线性关系,当内部温度低于 0℃时,打开电热毯加热,保证内部温度高于 0℃。见附图 3-1。

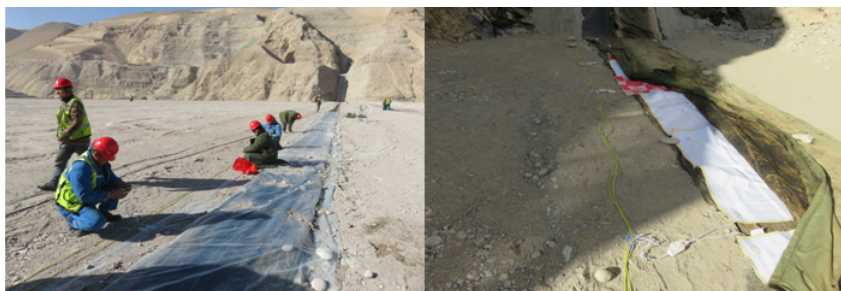


图 3-1 冬季停工期间保护

冬季及夏季沥青心墙施工阶段,为避免沥青心墙夜间受低温影响及风沙影响,在摊铺过程中,在摊铺机后面拖较厚的帆布,随着摊铺机的行进,对沥青混凝土心墙全断面拖盖。在停工前采用毡布及保温被覆盖沥青心墙,毡布上层再覆盖一层防雨布,对沥青混凝土心墙加以防冻保护。

3.4 沥青混凝土心墙施工防尘、防沙技术

防尘防沙是奴尔坝体工程施工中质量控制的重点之一,以保证层间结合质量。一要防止沙尘天气带来的沙尘,二要防止摊铺机过渡料装填过程中的散落污染,三要防止人员机械活动带来的层面污染。本工程根据施工实际探索,采取了以下措施:

3.4.1 摊铺机沥青混凝土出料口拖挂 3m 长白帆布,确保过渡料装填过程中散落不造成沥青混凝土污染。随着摊铺机前进,迅速用油帆布覆盖,宽度大于心墙宽度 40cm(心墙两侧各 20cm),保证整个施工过程帆布无缝结合,沥青混凝土不在外部暴露。

3.4.2 碾压完成后及时揭除油帆布并采用白色棉质帆布覆盖,确保摊铺完成后与下层结合面干净、整洁。也防止心墙表面温度散失过快,碾压后表面形成横向裂纹,必要时直接在厚帆布上碾压。

3.5 沥青混凝土碾压后气泡排放及碾压顺序控制技术

沥青混凝土心墙表面防风沙油帆布覆盖碾压,油帆布致密光滑和沥青很容易紧密粘合,碾压过程中沥青混凝土内部揉搓产生的气泡无法排出,造成沥青混凝土不密实同时也影响渗透性。采取了以下措施有效的解决了问题:

3.5.1 碾压后立即将油帆布掀起,待沥青混凝土内部排出内部气泡后再用苫布覆盖,通过以上措施,从现场钻取的芯样观察气泡基本消除。

3.5.2 碾压顺序控制措施:采用常规的“正品字”碾压顺序沥青混凝土和过渡料同时碾压,碾压后将心墙上下游侧挖开检查,发现铺层上部心墙宽度增大,且顶部盖帽较大的问题,部分沥青混凝土挤压到较松散的砂砾石过渡料内部;

铺层下部出现沥青混凝土心墙瘦身，形成犬牙交错现象，保证不了心墙设计形状和设计尺寸。通过改变碾压次序，先对砂砾石过渡料进行静压后，优先振动碾压沥青混合料再待沥青混凝土温度降到小于等于终碾温度时再碾压砂砾石过渡料的施工工艺，解决沥青瘦身和设计宽度的问题。

4 施工质量检测及质量控制

4.1 拌合站质量控制

4.1.1 人工砂单炒，先炒骨料后单炒砂。

4.1.2 骨料加热温度 $160^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ ，骨料加热温度不超过沥青加热温度的 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ，防止沥青发生老化，沥青混合料温度超过 190°C 应视为废了处理。

4.1.3 90# 沥青加热搅拌温度 $150^{\circ}\text{C} \sim 160^{\circ}\text{C}$ ，沥青混合料出机温度 $150^{\circ}\text{C} \sim 170^{\circ}\text{C}$ ；拌制的热混合料石粉含量不大于 3%，沥青混合料由下料口到拉运车高度不得大于 1.5m。

4.1.4 对不符合温度要求的热料及时排掉，待温度符合要求后方可开始拌制混合料，拌制混合料时，矿料干拌不少于 15s，再加入沥青拌和，搅拌时间应不少于 45s，经过现场取样观察，拌和出的沥青混合料色泽均匀，稀稠一致，无花白料、黄烟及其它异常现象，骨料沥青裹覆率良好。

4.1.5 对于因温度低或级配不能满足设计要求的废弃沥青混合料、粗细骨料混合料，可作为弃料处理，不得掺入成品料堆或再次使用。

4.2 施工过程质量检测、控制

4.2.1 在正常施工期间，试验室依据规范要求的检测频次，从拌和楼出机口取样，检查沥青混合料的沥青含量和矿料级配，并进行密度检测，若发现级配偏离时，对拌和楼热料仓中的骨料级配进行检测，并根据检测结果对配料单进行必要的调整。拌和楼配备自动打印装置，逐盘记录沥青和骨料称量记录，对每天或每个台班生产沥青混合料总量进行配合比偏差检验。

4.2.2 现场铺筑质量应以无损检测为主，采用无核密度仪检测密实度，渗气仪现场检测渗透性，对接缝处或可疑部位重点进行检测；对每层沥青混凝土进行外观检查，如发现裂纹等异常现象，查明原因，及时处理。

4.2.3 心墙每升高 2 ~ 4m 应钻取芯样一组（3 个）进行密度、孔隙率、沥青含量和矿料级配等验证性检验，并检查层间结合情况和两侧开槽检查心墙垂直度、宽度。

4.2.4 心墙每升高 10 ~ 12m 钻孔取芯，进行三轴、小梁弯曲等力学性能检验。对钻孔取芯后留下的孔洞应清理干净，并用海绵吸干水分，加热烘干，达到 70°C 以上，然后分 5cm 一层进行沥青混合料回填击实。

4.3 现场沥青混凝土控制标准

4.3.1 施工中严格控制外部环境，在日降雨超过 5mm，风速大于 4 级，气温低于 -5°C 时，坚决不能施工，夜间照明条件不好不能施工。

4.3.2 根据所取芯样试验结果可以看出：底部试件密度较上部试件密度小，说明填筑层上部易碾压密实，下部不易碾压密实，且下部密度随着碾压遍数增加而增大，因此，在施工过程中，严格控制铺料厚度、碾压遍数、碾压方式，确保整个断面厚度内压实质量。

4.3.3 随时目测热拌沥青混合料均匀性、是否冒黄烟、有无花白料等异常现象，并立即查明原因及时调整，确保混合料拌和质量。级配离析和温度离析是影响沥青混凝土质量均匀性重要因素，在施工过程中及时目测发现，采取有效措施避免产生。

4.3.2 碾压温度是确保碾压质量的重要参数之一，温度过低可能压不实，温度过高，混合料变形较大，表面可出现发丝状裂纹、拥包或推移，而且增加能耗成本，降低生产效率。沥青混合料入仓温度 $140^{\circ}\text{C} \sim 165^{\circ}\text{C}$ ，沥青混合料初碾温度 $140^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ ，最低不宜低于 130°C ，低温季节施工不低于 135°C ，沥青混合料终碾温度 $130^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ ，最低不宜低于 110°C ，对低于 110°C 的混合料作为废料废弃。

4.4 沥青混凝土层间结合面施工处理质量控制

4.4.1 接缝是沥青混凝土心墙的薄弱部位，在施工中应尽可能避免，应在摊铺前进行施工处理，在施工中应特别重视。心墙混凝土基座（或铜止水带）表面干燥、洁净，水泥混凝土基座表面经凿毛后涂刷 1 ~ 2 遍冷底子油，待干燥后再铺设 1 ~ 2cm 厚砂质沥青玛蹄脂。

4.4.2 施工接缝应采用斜面平接，斜面坡度宜为 45° 。施工前对接缝表面污物、杂物清除，然后进行加热，加热温度应控制在 $90 \sim 110^{\circ}\text{C}$ ，再涂刷热沥青。压实要及时跟进，可安排人工用振动夯板在摊铺完后立即进行，加强碾压确保压实质量，对接缝部位质量用真空渗气仪进行重点检测，若不合格时，应挖除置换新沥青混合料进行处理。

4.4.3 冬季沥青混合料出机口温度提高到上限，摊铺前层间处理干净后，对下层沥青表面不进行深度加热，利用上层新铺沥青混合料（ 165°C ）的热量，停滞约 20 分钟后，可将下层沥青混凝土融化 5cm 深，结合面温度可达到约 70°C 以上。摊铺后的沥青混合料表面用帆布覆盖保温，并且在施工过程中通过缩小碾压循环，以防止表面温度损失过快，从而保证沥青混合料的碾压温度。

4.5 沥青心墙试验及质量检测控制

4.5.1 沥青含量和矿料级配是影响沥青混凝土性能的重要检测指标，施工过程中重视抽提、热料筛分试验，并根据试验结果，有问题时及时对配料单做出相应调整。

4.5.2 沥青混凝土出机口温度和现场温度早中晚三个主要时段，每个时段检测不少于 4 个，雨天或低温时段增加

检测频次。

4.5.3 心墙碾压完后压实质量检测方法主要有：现场 EDG-A 沥青无核密度仪无损检测密度，用 ZC-6 型渗气仪无损检测沥青混凝土的渗透系数，现场取芯样检测和室内沥青混合料抽提及马歇尔击实试验检测。检测指标包括沥青混凝土密度 $>2.35\text{kg}/\text{cm}^3$ ，孔隙率 $<3\%$ ，渗透系数 $<1\times 10^{-8}$ 及其他设计指标。现场检测以无损检测为主，若发现不合格点，应立即钻取芯样进行测试，芯样测试不合格则要进行处理。

5 施工质量效果

5.1 质量检测和评定效果

5.1.1 质量评定情况：奴尔沥青心墙混凝土心墙自 2016 年 9 月 29 日正式开始铺筑，到 2017 年 9 月 12 日全部达到心墙坝顶 2498.5m 高程，砂砾料相对密度共检测 1803 组，相对密度在 0.85 ~ 0.99 之间，平均相对密度 0.89，满足设计相对密度 0.85 标准；砂砾石过渡料共检测 1254 组，相对密度在 0.85 ~ 0.97 之间，平均相对密度 0.89，满足设计相对密度 0.85 标准。

5.1.2 心墙坝沥青混凝土共使用沥青 6463.85t，检测 165 组；沥青矿粉使用 13030.5t，共检测 250 组；沥青混凝土砂石骨料使用 40000 m^3 共检测 114 组；共检测沥青混凝土马歇尔试件 224 组；沥青混凝土芯样 72 组；小梁弯曲及三轴试验检测 6 组；沥青混凝土施工过程温度控制检测 1700 余组；沥青心墙混凝土现场密度检测 35054 组；检测频次及检测结果均符合符合设计及规范要求。检测情况见表 5-1 ~ 表 5-6。

5.1.3 沥青心墙混凝土共完成单元工程 287 个，单元工程验收合格率为 100%，优良率达 92.7%。

表 5-1 沥青混凝土芯样检测结果统计

检测项目	密度 (g/cm^3)	平均密度 (g/cm^3)	最大密度 (g/cm^3)	孔隙率 (%)	压实度 (%)	渗透系数 (cm/s)	水稳定系数 (%)
指标	≥ 2.35	≥ 2.35	/	< 3	/	$\leq 1\times 10^{-8}$	≥ 0.9
组数	293	72	72	72	72	1713	13
最大	2.447	2.436	2.460	2.44	99.5	9.22×10^{-9}	0.96
最小	2.383	2.399	2.445	0.51	97.6	2.45×10^{-9}	0.91
平均	2.420	2.420	2.456	1.48	98.5	5.87×10^{-9}	0.93
备注	依据设计：联总字2016第006号HE-BG-07附件及SL514-2013						

表 5-2 沥青心墙混凝土小梁弯曲及三轴试验结果统计表

检测项目	密度 (g/cm^3)	最大密度 (g/cm^3)	孔隙率 (%)	小梁弯曲 (4.7℃)		三轴试验 (4.7℃)	
				抗弯强度 (kPa)	最大弯拉 应变 (%)	内摩擦角 (°)	黏结力 (kPa)
指标	≥ 2.35	≥ 2.35	< 3	≥ 400	≥ 1	≥ 25	≥ 300
最大	2.420	2.464	1.9	2200	2.449	28.8	444
最小	2.410	2.442	1.3	1324	1.930	25.9	318
平均	2.415	2.458	1.7	1638	2.201	27.4	365
备注	依据设计：联总字2016第006号HE-BG-07附件及SL514-2013，共6组						

表 5-3 沥青混合料抽提分析试验结果统计表

检测项目	沥青含量 (%)	颗粒级配(通过率%)										
指标	6.4~7.0	19.0~95.0~100.0	16.0~88.5~98.5	13.2~81.8~91.8	9.5~71.4~81.4	4.75~53.5~63.5	2.36~40.6~48.6	1.18~30.2~38.2	0.6~22.4~30.4	0.3~16.2~24.2	0.15~11.6~19.6	0.075~10.0~14.0
最大	6.98	100.0	96.9	90.3	80.0	62.1	47.6	38.0	29.0	23.5	17.5	13.7
最小	6.65	98.2	91.2	83.2	72.1	54.2	41.2	32.0	23.8	18.2	13.6	10.3
平均	6.81	99.9	93.9	87.0	76.7	58.6	44.9	34.6	26.7	20.5	15.7	12.1
备注	联总字2016第006号HE-BG-07附件及SL514-2013，共224组											

表 5-4 沥青心墙混凝土马歇尔试件试验结果统计表

检测项目	最大密度(g/cm^3)	试样密度(g/cm^3)	孔隙率 (%)	稳定度 (N)	流值 (0.1mm)
	≥ 2.35	≥ 2.35	< 2	≥ 5000	30~110
组数	224	224	224	224	224
最大	2.466	2.451	1.03	8760	104
最小	2.440	2.343	0.33	5700	76
平均	2.457	2.438	0.75	6329	91

表 5-5 沥青混凝土施工过程温度控制检测统计表

检测项目	拌合站出口温度检测				施工现场温度检测				
	骨料温度℃	沥青℃	出机口温度℃	气温℃	层间结合面温度℃	入仓温度℃	初碾温度℃	终碾温度℃	气温℃
组数	141	343	5507	35	146	7690	1642	1514	80
最大	198.3	182	187.7	28	89	180	163	149	29

最小	160.5	140	145	4	69	133	43	110	-10
平均	178	153	166	12	74	159	145	134	10

表 5-6 沥青心墙混凝土现场密度检测结果统计表

检测项目	检测时温度℃	EDG-A 无核密度仪检测			
		最大理论密度 (g/cm ³)	仪器检测密度 (g/cm ³)	仪器检测孔隙率 (%)	仪器检测压实度 (%)
指标	/	/	≥2.35	<3	/
组数	6989	7014	7014	7014	7014
最大	94.8	2.466	2.434	2.93	98.7
最小	5.8	2.440	2.385	0.66	98.4
平均	46.2	2.457	2.421	1.49	98.5
备注	无核密度仪最大检测深度检测30cm, 虚铺层厚度约30cm, 碾压后约28cm。				

5.2 蓄水后检验效果

5.2.1 蓄水情况: 奴尔水枢纽工程于 2018 年 8 月 5 日下闸蓄水, 下闸蓄水当日库水位为 2432.3m 高程, 截止 8 月 29 日坝前水位 2466.6, 基座混凝土高程 2422.3, 水位升高 44.3 米。

5.2.2 大坝渗流观测成果: 在大坝下闸蓄水后, 下游坝体渗流的时间、空间分布规律主要表现为以下几点: 在蓄水过程中, 0+290m、0+540m 断面坝基防渗墙下游侧埋设的 P2、P5 测点的渗压水位分别由 2410.738m、2410.403m 高程升至 2417.119m、2419.232m 高程。坝基测点渗压水位与库水位相关图见图 5-1, 坝体轴线纵断面图见图 5-2。

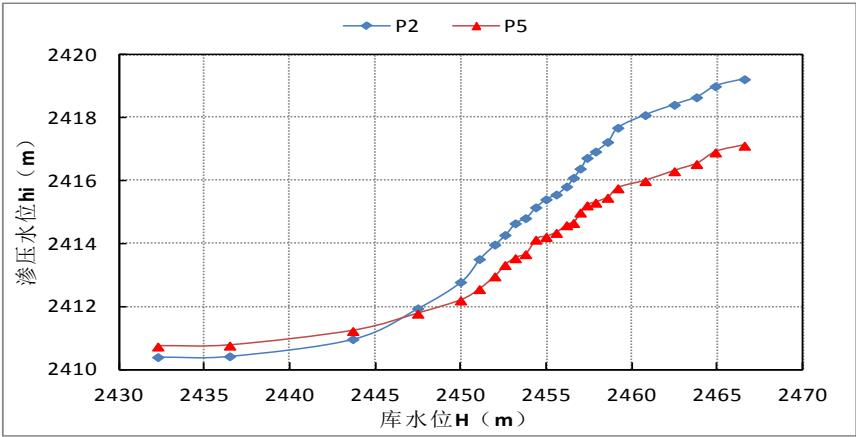


图 5-1 坝基测点渗压水位与库水位相关图

(1) 下闸蓄水前, 上游水位维持在 2430 ~ 2432m 高程时, 河槽左岸 0+166m 桩号心墙基座下游侧的 P10 (埋设高程 2420m) 即表现为 1.389m 的渗压水头。蓄水后, 上游水位呈持续上升状态, 目前, 上游水位已升至 2466.6m 高程, 而 P10 测点的渗压水位在原来的基础上又上升了 2.179m, 当前部位的渗压水位达 2423.568m, 变化不大。

(2) 大坝轴线纵剖面 0+230.5m ~ 0+456.5m 桩号河床段心墙基座下游部位目前无渗压水头, 0+290m 横监测断面从心墙基座下游部位至坝后 120m 处目前坝体也未形成浸润线。

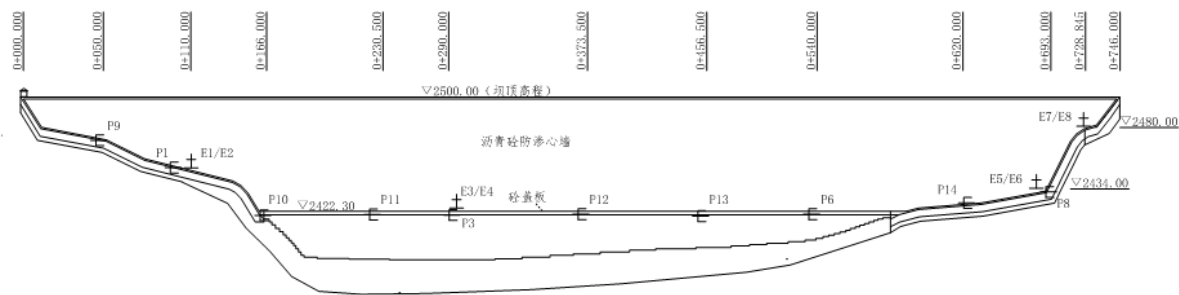


图 5-2 大坝心墙基座下游侧渗压计布置图

5.3 坝体监测效果

5.3.1 大坝沉降变形观测成果: 2018 年 8 月 5 日至 8 月 19 日工程初蓄期间, 大坝沉降量不大, 各测点的沉降变形在 3 ~ 14mm 之间, 大坝自 2015 年 10 月 29 日开始填筑, 下闸蓄水后, 大坝最大沉降变形发生在最大河床段 0+290m/0+540m 断面坝轴线附件, 累计沉降分别为 242mm、259mm 占填筑厚度的 0.30%、0.32%; 覆盖层基础沉降最大发生在 0+290m 断面, 其沉降量为 59mm, 与国内外面板堆石坝施工期坝体最大沉降量与坝高, 一般不超过 0.5% 相比, 本工程施工期沉降不大。坝体的单点最大沉降发生在坝体 (含坝基覆盖层厚度) 的 1/3 ~ 2/3 处, 为目前同类变形的最好效果, 同时也说明工程质量良好。

5.3.2 心墙与过渡料位错变形: 两者竖直错变形规律相近, 呈上部变形小, 下部变形大的分布, 两者位错变形最

大的部位发生在 0+693m, 2450m 高程断面的上游处, 其最大值为 37.3mm, 处于同类坝形的中游水平。沥青混凝土心墙从施工填筑开始至今, 个别心墙部位偏移变化量较小, 测值均小于 0.8mm, 大坝心墙变形趋于平稳。工程初蓄期间, 沥青心墙与过渡料间竖向相对位错变形变幅在 0~4mm 之间, 变化量不大。

5.3.3 心墙挠度变形: 工程初蓄期间, 沥青心墙自身挠度变形的变幅在 0.2~1.2mm 之间, 变化量不大。大坝水平方向位移大部分发生在坝体填筑阶段。截止目前, 最大上下游向水平变形发生在最大河床段 0+290m 断面轴线下 40m 处, 累计向上游变形 169.0mm, 通过以上监测数据可以看出, 大坝整体稳定。

5.3.4 沥青心墙内部温度监测: 沥青混凝土混合料入仓温度一般在 160±10℃ 之间, 符合沥青心墙入仓温度控制, 目前, 心墙 2435m 高程的温度在 7.2℃~7.7℃ 之间, 2450m 高程的温度在 8.4℃~8.8℃ 之间, 2465m 高程的温度在 10.8℃~12.4℃ 之间, 2480m 高程的温度在 18.8℃~19.6℃ 之间, 按照施工期的长短, 目前呈逐步下降阶段, 目前环境温度在 10℃~21℃ 之间。

6 结语

奴尔水利枢纽工程碾压式沥青心墙砂砾石坝经过精心细致的试验研究, 两次的沥青混凝土配合比的试验论证, 以及关于小于 0.075mm 酸性填“石粉”代替部分灰岩填料的专家技术研讨, 成功的解决了坝体碾压式沥青混凝土酸性骨料、砂砾石骨料和酸性填料的工程技术难题; 通过精心细致的施工技术和施工工艺研究, 以及严格的工程质量控制, 在极端施工环境温度为 -15℃ 及多风沙扬尘的气候条件下, 按期完成了工程的沥青混凝土施工, 达到快速施工的目的。而且通过现场及第三方检测试验, 心墙沥青混凝土经无损检测和钻孔取芯检测试验结果均满足设计及规范要求。为高寒多风沙地区碾压式沥青混凝土心墙坝施工提供借鉴经验。也为我国沥青混凝土坝施工技术的发展, 奠定了坚实的技术支持。

[参考文献]

-
- [1] 《土石坝沥青混凝土面板和心墙设计规范》SL501—2010;
 - [2] 《水工沥青混凝土施工规范》SL/514-2013;
 - [3] 《沥青混凝土施工规范》DL/T5363-2006;
 - [4] 《奴尔水利枢纽工程沥青混凝土心墙应用天然砂砾石试验研究报告》长江水利委员会长江科学院、国家大坝安全工程技术研究中心、水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心 2016 年 3 月;
 - [5] 《奴尔水利枢纽工程沥青混凝土心墙应用天然砾石破碎骨料补充试验研究报告》 2017 年 3 月;
 - [6] 《新疆奴尔水利枢纽工程沥青心墙混凝土室内生产配合比现场验证试验报告》中国水电十五局新疆奴尔水利枢纽工程工地试验室 2016 年 6 月;
 - [7] 《新疆奴尔水利枢纽工程碾压式沥青混凝土及过渡料碾压试验报告》中国水电十五局新疆奴尔水利枢纽工程工地试验室 2016 年 9 月;
 - [8] 《新疆策勒县奴尔水利枢纽工程安全监测施工管理工作报告》(下闸蓄水阶段)新疆水利水电科学研究院 2018 年 7 月。