

# 新疆某工程碾压混凝土坝施工期温控防裂

蒋小健<sup>1</sup>, 秦明豪<sup>2</sup>, 王立成<sup>3</sup>

(1 阿勒泰地区萨尔托海水库管理处 新疆 阿勒泰 836500 2 中国水利科学研究院 北京 10038 3 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222 )

**摘要:** 新疆某水利枢纽工程地处严寒干旱地区, 其库容为 2.94 亿 m<sup>3</sup>, 属大(2)型工程, 其挡水建筑物为碾压混凝土重力坝, 最大坝高 75.5m。典型严寒地区“冷”、“热”、“风”、“干”的不利气候因素和长间歇式的施工方式增加了坝体混凝土的温控防裂难度。通过从设计到施工采取一些列温控措施, 包括控制浇筑温度、优化水管冷却、坝面永久保温、仓面和其他临空面春秋季节临时保温和越冬保温、优化浇筑计划等, 大大降低了大坝混凝土的开裂风险, 使大坝混凝土的温度裂缝得到有效控制。

**关键词:** 严寒地区; 碾压混凝土坝; 温控; 水管冷却; 保温

## Temperature Control and Thermal Cracking Prevention of A RCC Dam in Xinjiang during its Construction

JIANG Xiaojian<sup>1</sup>, QIN Minghao<sup>2</sup>, Licheng WANG<sup>3</sup>

(1 The Administrative Agency of SETH Reservoir, Altay 836500, Xinjiang; 2 Department of Materials, IWHR, 100038, Beijing; 3 China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd. , Tianjin 300222 )

**Abstract:** A water resources project, with a maximum reservoir capacity of 294 million m<sup>3</sup>, and Grade IIB in scale, is located in a severe cold and arid region of Xinjiang Autonomous Region. Its water-retaining structure is a RCC gravity dam, with a maximum dam height of 75.5m. The typical unfavorable climate conditions (“cold”, “hot”, “windy” and “dry”) in a severe cold and arid region , the long period of construction suspension during winter and the associated problems posed a lot of challenges for the temperature control and thermal cracking prevention of the dam. By taking comprehensive measures through the design and construction of the dam, including placing temperature control, pipe cooling optimization, permanent insulation of the upstream and downstream dam surface, insulation of the lift surface and other exposed surfaces of the dam during winter and abrupt temperature drop periods, the risk of thermal cracking in the dam has been substantially reduced, and the thermal cracks in the dam have been under effective control.

**Key words:** Severe cold region; RCC dam; temperature control; pipe cooling; insulation

## 1 工程概况及其温控特点

新疆某水利枢纽工程主要由拦河坝、泄水建筑物、发电引水系统、坝后式电站厂房和过鱼建筑物等组成。拦河坝为碾压混凝土重力坝，正常蓄水位 1027m，最大坝高 75.5m，坝顶高程 1032.0m。水库总库容 2.94 亿  $m^3$ ，多年平均供水量 2.67 亿  $m^3$ ，设计水平年改善灌溉面积 27.61 万亩，电站装机 27.6MW。工程等别为 II 等，工程规模为大（2）型。坝体上游面采用二级配富胶凝碾压混凝土+变态混凝土+辅助防渗层的防渗结构型式。本工程坝体混凝土总量为 88.1 万  $m^3$ ，其中碾压混凝土总量为 59.4 万  $m^3$ 。

据工程附近的气象站资料统计，工程区多年平均降水量 188.7mm，年降水量的 57%集中在 5~9 月；平均水面蒸发量达 1410.1mm（20cm 蒸发皿观测值），其中 5~8 月的蒸发量占全年的 66%，最大蒸发量多出现在 6 月份；多年平均气温 3.6℃，气温年际变化不大，年内变化很大，极端最高气温 38.4℃，极端最低气温 -47.7℃，变幅达 86.1℃；历年最大风速 17.3m/s，最大冻土深度 239cm<sup>[1]</sup>。

典型严寒地区“冷”、“热”、“风”、“干”的不利气候因素和碾压混凝土坝分层碾压、通仓浇筑等施工特点使得该工程的混凝土温控具有以下特点：

混凝土施工期集中在 4 月~10 月，11 月~次年 4 月平均气温均在 -4℃ 以下，12 月~次年 2 月平均气温在 -11℃ 以下，且风大雪大，不适合混凝土施工，这种严寒气候条件和长间歇式的施工方式增加了坝体混凝土的温控防裂难度：坝体上下游面必须进行永久保温，越冬仓面及未进行永久保温的上下游坝面和其他临空面（横缝面等）在冬季需进行越冬保温，越冬面上浇筑新混凝土层的温控难度较大；

夏季气温较高（6~8 月平均气温在 18℃ 以上），混凝土温控降温问题较为突出，须采取控制浇筑温度、仓面保温、仓面喷雾降温、混凝土内部采用冷却水管降温等一系列工程措施，降低混凝土内部最高温度，降低后期混凝土温控难度；

春秋季节（4~5 月和 9 月~10 月）寒潮频发，需对各临空面（仓面、上下游坝面和其他立模面）进行妥善临时保温，减小内外温差，降低混凝土开裂风险；

全年气候干燥，风大，需对混凝土表面采取妥善保温保湿措施，防止因混凝土表面干缩从而增加混凝土表面开裂风险。

针对这些温控特点，通过从设计到施工采取一系列温控措施尽可能降低大坝混凝土的开裂风险，收到良好效果。

## 2 设计温控标准和要求

在施工期根据大坝混凝土热力学性能复核试验结果和施工实际情况，对大坝施工期和运行期的温度和应力进行了仿真计算，根据仿真计算结果，对原设计拟定的温控指标，包括基础容许温差、

上下层容许温差、容许内外温差和容许最高温度，进行了调整，调整后的结果如下所述：

### 2.1 基础容许温差

基础温差系指建基面  $0.4L$  ( $L$  为浇筑块长边尺寸) 高度范围的基础约束区内混凝土的最高温度和该部位稳定温度之差<sup>[2]</sup>。该工程调整后的基础容许温差如表 1<sup>[3]</sup>所示。

**表 1** 基础容许温差

距离基础面高度 $h$ (m)	浇筑块长边长度 $L$ (m)	
	30m 以下	30m~50m
0~0.2L (强约束区)	16℃	14℃
0.2~0.4L (弱约束区)	18℃	16.0℃

### 2.2 新老混凝土容许温差

考虑到碾压混凝土的抗裂性能较低，其极限拉伸值小于常态混凝土，在间歇期超过 21 天的老混凝土面上继续浇筑时，老混凝土面上新浇混凝土的最高温度与新混凝土开始浇筑时老混凝土 ( $1/4L$  范围内) 的平均温度之差 (新老混凝土温差，亦称上下层温差) 从严按不超过 15℃ 控制。

### 2.3 内外容许温差

为了不使碾压和常态混凝土产生太大的表面温度应力，防止发生表面裂缝，必须对混凝土的内外温差进行限制，考虑碾压混凝土早期抗裂性能较常态混凝土为低，早期形成的容许内外温差为 12℃，中后期形成的内外温差为 14℃。

### 2.4 坝体混凝土浇筑温度

坝体混凝土各月浇筑温度按表 2<sup>[1]</sup> 所示控制。表中 1 区指强约束区 (基础强约束区和老混凝土面上  $0\sim L/4$  范围新浇混凝土区，2 区指基础弱约束区，3 区为 1 区和 2 区除外区域；填塘和陡坡部位的混凝土按照强约束区对待。

**表 2** 坝体混凝土各月容许浇筑温度

月份	4	5	6	7	8	9	10	
月平均气温 (℃)	5.9	13.6	18.7	20.2	18.2	11.8	3.7	
浇筑温度 (℃)	1 区	自然入仓	12	12	12	12	自然入仓	
	2 区	自然入仓	12	15	15	15	12	自然入仓
	3 区	自然入仓	自然入仓	自然入仓	自然入仓	自然入仓	自然入仓	自然入仓

### 2.5 坝体混凝土容许最高温度

施工过程中基础温差、新老混凝土温差和内外温差较难控制，一般通过控制混凝土内部最高温度来实现。根据上述各温差控制要求，并参考类似工程经验，本工程坝体混凝土最高温度按表 3<sup>[1]</sup>

所示控制。

**表 3** 坝体混凝土容许最高温度 (°C)

区域	月份						
	4	5	6	7	8	9	10
1 区	18	20.5	22	22	22	20.5	16
2 区	20	23	24.5	24.5	24.5	23	18
3 区	24	32	34	34	34	32	23

### 3 大坝温控与防裂措施

#### 3.1 优化施工配合比

原大坝混凝土施工配合比由中国水利水电第四工程局试验中心设计。在工程建设过程中,业主(阿勒泰地区萨尔托海水库管理处)委托中国水利水电科学研究院材料所(以下均简称中国水科院)对 5 个用量较多的施工配合比(常态混凝土 C<sub>28</sub>25W6F300、碾压混凝土 C<sub>90</sub>20W6F50、富胶凝碾压混凝土 C<sub>90</sub>20W4F200、机制变态混凝土 C<sub>90</sub>20W6F100 和 C<sub>90</sub>20W6F300)大坝混凝土的热力学性能进行复核试验,以便为施工期大坝温控仿真计算和分析提供必要的混凝土热力学参数。在对 5 个混凝土施工配合比(表 4)进行初步分析后,中国水科院材料专家认为工程所用各混凝土施工配合比的用水量均偏高,随根据经验和室内拌合试验,在保持水胶比不变、满足各配比设计 VC 值/塌落度以及设计含气量的条件下,对工程现场实际采用的混凝土施工配合比进行了微调(表 5)。与现场实际采用的混凝土施工配合比相比,微调后各原材料用量主要变化包括:单位体积混凝土用水量减少 8~21.78kg,胶凝材料用量减少 17~48.63kg,砂率均增加 1%(砂用量增加 18~34kg),减水剂用量减少,三级配混凝土(常态混凝土和大坝内部碾压混凝土)引气剂用量分别增加 0.4/万和 2/万,二级配混凝土(富胶凝碾压和变态混凝土)引气剂用量减少 8/万~13/万。热力学复核试验结果表明,与现场采用的施工配合比的结果相比,微调后各配比混凝土的各项力学性能指标(抗压强度、轴拉强度和极限拉伸等)均明显占优(表 6 和表 7),绝热温升降低,混凝土的抗冻性能满足设计要求。

鉴于微调后混凝土配比的胶凝材料用量和用水量减少,既节约成本,又有利于温控防裂(水化热较低,收缩和自生体积变形较小),且各项热、力学指标均有明显改善,混凝土抗冻性亦满足设计要求。结合现场实际情况,对施工采用的混凝土配合比进行了调整。

#### 3.2 施工过程中的温度控制措施

(1) 合理利用施工时段。尽量利用每年 4 月~5 月、9 月~10 月低温季节多浇、快浇混凝土,高温季节(6~8 月)尽量利用夜间浇筑混凝土,这样不仅可以节省温控(主要为骨料预冷)费用,而且可以确保混凝土的浇筑质量。

表 4

微调前采用的大坝混凝土施工配合比

编号	现场配比 编号	工程 部位	混凝土 种类	设计 指标	级配	水胶 比	粉煤灰 (%)	砂率 (%)	减水剂 (%)	引气剂 (1/万)	混凝土材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )						
											水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石
SC3-42-30	STHCT-5	进水口、 边墩、坝顶	常态	C <sub>28</sub> 25W6F300	三	0.42	20	29	0.9	1.0	120	229	57	580	426	426	568
SR3-47-60	NY-02	大坝内部	碾压	C <sub>90</sub> 20W6F50	三	0.47	60	33	1.0	10	90	77	115	708	431	575	431
SR2-45-50	FJNNY-02	下游坝面	碾压	C <sub>90</sub> 20W4F200	二	0.45	50	37	1.0	20	100	111	111	771	591	722	/
SB2-45-55	BT-02	上游坝面 (▽956.5~986.0m)	变态 (加浆 6%)	C <sub>90</sub> 20W6F100	二	0.45	55	37	1.0	15	100	100	122	764	585	716	/
					灰浆	0.45	55	/	0.6	/	570	570	697	/	/	/	/
SB2-45-45	BT-04	上游坝面 (▽986.0~1032.0m)	变态 (加浆 7%)	C <sub>90</sub> 20W6F300	二	0.45	45	37	1.0	20	100	122	100	764	586	716	/
					灰浆	0.45	45	/	0.6	/	570	697	570				

表 5

微调后的大坝混凝土配合比

编号	现场配比编号	工程部位	混凝土种类	设计指标	级配	水胶比	粉煤灰 (%)	砂率 (%)	减水剂 (%)	引气剂 (1/万)	混凝土材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )						
											水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石
SC3-42-30	STHCT-5	进水口、边墩、坝顶	常态	C <sub>28</sub> 25W6F300	三	0.42	20	30	0.8	1.4	110	210	52	611	428	428	571
SR3-47-60	NY-02	大坝内部	碾压	C <sub>90</sub> 20W6F50	三	0.47	60	34	0.6	12	82	70	105	742	433	578	433
SR2-45-50	FJNNY-02	下游坝面	碾压	C <sub>90</sub> 20W4F200	二	0.45	50	38	0.7	10	92	102	102	790	581	710	/
SB2-45-55	BT-02	上游坝面 (▽956.5~986.0m)	变态 (加浆 4%)	C <sub>90</sub> 20W6F100	二	0.45	55	38	0.6	7.0	92	92	112	789	581	710	/
					灰浆	0.45	55	/	0.3	/	570	570	697	/	/	/	/
SB2-45-45	BT-04	上游坝面 (▽986.0~1032.0m)	变态 (加浆 4%)	C <sub>90</sub> 20W6F300	二	0.45	45	38	0.7	7.0	92	112	92	791	582	711	/
					灰浆	0.45	45	/	0.3	/	570	697	570				

表 6

微调前后各配比混凝土抗压强度试验结果

编号	设计指标	配制强度(MPa)	抗压强度 (MPa)					
			7d		28d		90d	
			微调前	微调后	微调前	微调后	微调前	微调后
SC3-42-20	C <sub>28</sub> 25W6F300	31.6	25.9	30.6	36.8	44.2		57.0
SR3-47-60	C <sub>90</sub> 20W6F50	23.4	10.7	13.7	17.3	25.9	25.9	34.1
SR2-45-50	C <sub>90</sub> 20W4F200	23.4	14.7	16.1	23.4	28.6	32.2	37.8/
SB2-45-55	C <sub>90</sub> 20W6F100	23.4	14.7	13.2	23.1	26.6	33.1	36.2
SB2-45-45	C <sub>90</sub> 20W6F300	23.4	16.5	13.9	23.7	26.9	34.1	38.1

表 7 微调前后各配比混凝土轴拉强度和极限拉伸试验结果(微调前各配比混凝土未进行 7 天和 180 天龄期轴拉和极限拉伸试验)

编号	设计指标	轴拉强度 (MPa)					极限拉伸值 ( $\times 10^{-6}$ )					
		7d		28d		90d	7d	28d		90d		180d
		微调后	微调前	微调后	微调前	微调后	微调后	微调前	微调后	微调前	微调后	微调后
SC3-42-20	C <sub>28</sub> 25W6F300	2.61	3.44	3.26		3.97	101	101	120		126	128
SR3-47-60	C <sub>90</sub> 20W6F50	1.58	1.78	2.43	2.54	3.31	65	69	90	83	100	102
SR2-45-50	C <sub>90</sub> 20W4F200	1.57	2.42	2.62	3.17	3.34	63	74	94	90	101	104
SB2-45-55	C <sub>90</sub> 20W6F100	1.49	2.31	2.43	3.13	3.34	65	80	94	90	106	108
SB2-45-45	C <sub>90</sub> 20W6F300	1.58	2.29	2.56	3.17	3.40	77	82	97	92	110	112

(2) 严格控制浇筑层厚度和层间间歇时间。为利于混凝土浇筑块的散热，强约束区(1区，见2.4节解释)浇筑层高一般控制在1~1.5m，其他部位最大浇筑高度控制在1.5~3m以内，上、下层浇筑间歇时间控制在5~10d。

(3) 做好遮阳隔热。在混凝土运输自卸车顶部加设活动遮阳棚，在车厢侧面喷涂聚氨酯隔热，在输送混凝土的皮带机上部架设遮阳防雨棚。通过运输、浇筑过程中的各种防护措施，减少混凝土在运输途中的温度回升，控制混凝土温度从出机口至浇筑完成温度在春秋季节回升不超过3℃，在夏季不超过5℃。

(4) 加强现场管理，加快施工速度。强化各工序的紧密衔接，缩短混凝土运输及等待卸料时间，入仓后快速摊铺、快速碾压(振捣)，加快混凝土覆盖浇筑速度，严格控制直接铺筑层间间隔时间不超过6h。

(5) 仓层浇筑期间仓面保温和保湿。采取快速入仓、快速平仓、快速碾压，保证混凝土从拌和到碾压完毕不超过2h，有效较少外界大气热量倒灌；非强约束区混凝土每仓浇筑高度3m，在高温及大风季节将仓面模板一次加高到6m，每次开仓前先进行雾炮机试喷，根据风向确定最佳水流量和压力及雾炮机摆放位置和角度，在施工中使仓面形成雾气小气候。同时安排工人手持喷雾枪对仓面进行补喷，争取达到较好的仓面喷雾保湿和降温效果。在开仓前准备足够的彩条布和聚乙烯卷材(或保温被，以下均称聚乙烯保温被)，在浇筑坯层碾压/振捣完毕后立即覆盖彩条布对仓面进行保湿，当气温较高(高于25℃)，在彩条布上覆盖一层聚乙烯保温被进行隔热。

(6) 仓层间隔期间仓面保温和保湿。在完成整个浇筑仓层的施工，待混凝土初凝后2~4小时开始对整个仓面进行冲毛处理，冲毛处理后的仓面用毛毡(毛毡厚度 $\geq 300 \text{ g/m}^2$ )覆盖，并将毛毡洒水湿透，对仓面进行保湿，毛毡上用彩条布严密覆盖，避免水分蒸发。在春秋季节(4~5月和9~10月)，工程区寒潮(连续2~3天平均气温降低6℃以上)频发，对仓面除按上述方法保湿外，时刻注意天气预报，如遇寒潮，在彩条布上加盖一层(4月30号以后或9月30日以前)或二层(4月30号以前或9月30日以后)聚乙烯保温被进行临时保温，保温被之间相互搭接宽度不少于5cm。聚乙烯保温被上用彩条布或三防布覆盖，其上用重物压盖，避免被大风掀起吹散。仓面保湿和临时保温至其下一仓层混凝土备仓。

(7) 混凝土施工期间(4~10月)大坝临空面保湿和保温。大坝混凝土临空面(原立模面)拆模后的保湿和保温在春秋季节(4~5月及9~10月)可采用1~2层聚乙烯保温被及外覆1层彩条布的方法进行。在夏季对大坝临空面采用河水进行流水降温和养护。秋季大坝临空面的临时保温和保湿持续至实施永久保温或越冬保温。

### 3.3 施工期坝体混凝土最高温度控制

鉴于本工程大坝混凝土胶材用量较多(混凝土配比微调后胶材用量有所降低,但依然较多),绝热温升较高(碾压混凝土 23℃,富胶凝碾压混凝土 26.5~27.3℃,机制变态混凝土 28.7~29.8℃),高温季节混凝土内部最高温度达到设计控制要求的难度较大(尤其是在基础约束区或老混凝土约束区)。施工中主要采用三种方法对混凝土内部最高温度加以控制:

(1) 通过采取一系列措施控制混凝土的平均浇筑温度在强约束区(邻近基础或老混凝土,亦即 1 区)不超过 12℃,在其他部位不超过 15℃。降低浇筑温度不仅直接降低混凝土内部最高温度,且因水泥在较低的混凝土温度下水化较慢,混凝土内部达到最高温度的时间延缓,更利于水管冷却发挥其削峰作用。本工程所用降低浇筑温度的措施主要包括:通过采取地垅取料、混凝土浇筑前 4~5 小时开始风冷骨料和加冷水拌合等措施控制混凝土出机口温度;通过对混凝土运输或传送设施采取遮阳隔热措施减少混凝土在运输过程中的温度回升;通过仓面喷雾降温、快速摊铺碾压、碾压后及时用彩条布和聚乙烯保温被进行保湿和隔热,尽可能减少混凝土在摊铺碾压过程中的温度回升。

(2) 采用水管冷却对坝体混凝土进行削峰降温:HPDE 水管间距一为 1.5m×1.5m,在强约束区加密至 1.0m×1.0m,富胶凝碾压混凝土区和机制变态混凝土区加密至 1.0m×0.75m;冷却水在春秋季节采用河床基岩裂隙水,水温 8~10℃。夏季采用机组制冷水,水温 8℃;通水流量在升温期不超过 2.0m<sup>3</sup>/h,降温期不超过 1.2m<sup>3</sup>/h;通水时间随混凝土层间间隔时间和季节变化,对于连续浇筑(层间间隔不超过 7 天)的混凝土层,其水管冷却通水时间在夏季(6~8 月)为 20 天,在春秋季节 7~15 天或取消冷却通水,实际通水时间根据气温、混凝土浇筑温度以及混凝土内部温度变化,由现场工程师确定。对于层间间隔超过 10 天的混凝土层,其水管冷却通水时间在夏季不超过 10 天,在春秋季节可减少至 5~7 天或取消。

(3) 充分利用混凝土表面散热降低内部最高温度:春秋季节若无寒潮,在升温阶段(从混凝土浇筑到其内部温度达到最高,一般为 2~4 天,随浇筑温度、水管冷却情况(水管间距,冷却水温和流量和环境温度变化)仅对混凝土仓面进行保湿,充分利用仓面散热。一般在降温阶段才对仓面用彩条布,必要时用 1~2 层(单层厚 2cm)聚乙烯保温被进行临时保温。在夏天对仓面和立模面采用流水养护和降温,拆模前对模板进行喷淋降温。

### 3.4 大坝永久和越冬保温

如前所述,本工程位于严寒地区,每年仅 4 月~10 月适合混凝土施工,11 月~次年 3 月平均气温均在-4℃以下,尤其是 12 月~次年 2 月,平均气温在-11℃以下,且风大雪大,不得不停工冬休。这种严寒气候条件和长间歇式的施工方式大大增加了坝体混凝土的温控防裂工作:坝体上下游面必须进行永久保温,越冬仓面及未进行永久保温的上下游坝面和其他临空面(横缝面等)在冬季必须进行越冬保温:

(1) 根据大坝施工期和运行期温度应力仿真计算和分析结果,本工程采用在大坝上下游面均喷涂 10cm 厚发泡聚氨酯(导热系数<0.024W/m.K)进行永久保温。

(2) 参考类似工程经验并经大坝施工期温度应力仿真计算和分析验证, 越冬仓面及未进行永久保温的上下游坝面和其他临空面(横缝面等)的越冬保温按下述方式实施:

(a) 越冬仓面保温: 仓面越冬期的表面放热系数应不大于  $0.7 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ , 实施中采用在仓面铺设一层土工布, 上覆聚乙烯保温被(10层, 总厚度不小于  $20\text{cm}$ , 导热系数不小于  $0.038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) 或黑心棉被(13层, 总厚度不小于  $25\text{cm}$ , 导热系数不小于  $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), 保温被之间相互搭接宽度不小于  $5\text{cm}$ , 在保温被上用土工布或防水彩条布覆盖, 土工布之间搭接宽度不小于  $50\text{cm}$ , 搭接部位用钢管和沙袋压实, 仓面周边用沙袋无间隙压盖, 确保仓面保温任何一处越冬期不被大风掀起, 确保越冬面保温效果。

(b) 未能进行永久保温的上下游坝面和其他临空面(横缝面等)的越冬保温根据具体情况采用不同的方法实施:

i. 未拆模板部位(主要为越冬面周边大坝上下游面和横缝面): 参考永久保温措施, 在钢模板外喷涂  $10\text{cm}$  后发泡聚氨酯进行越冬保温。

ii. 已拆模板但由于各种原因未能进行永久保温的大坝上下游面及横缝面: 在混凝土立面上张贴  $10\text{cm}$  厚 EPS 苯板, 用将整个张贴苯板的立面用防水彩条布(或土工布)蒙盖, 彩条布或土工布搭接宽度不小于  $30\text{cm}$ , 周边或搭接部位用板条压实并用发泡聚氨酯密封, 避免冷空气进入。

iii. 蓄水或填土保温: 根据越冬期上游围堰前的水位变化情况及越冬仓面高程分析, 若不采取措施, 越冬期基坑水位在 2018~2019 年越冬期将淹没 10#~14#坝段的越冬仓面, 为避免这种极为不利情况的发生, 冬休前在下游围堰开口, 开口底部高程低于 10#~14#坝段的越冬仓面至少  $1.0\text{m}$ , 且略高于越冬期下游水位, 使大坝下游基坑内渗水可排至下游, 避免越冬仓面被淹。同时设水泵定时抽水, 控制上游基坑内水位低于越冬仓面高程至少  $0.5\text{m}$ , 在将被淹没的 10#~17#坝段上游面未拆模板外侧喷涂  $10\text{cm}$  发泡聚氨酯进行越冬保温, 10#~17#坝段上游面已拆模板部位在越冬期将低于基坑内水位至少  $4\text{m}$  以上, 越冬期不做特殊防护, 仅利用基坑蓄水进行保温。受结构布置和施工进度的影响, 在 2018~2019 年冬休开始时, 10#底孔坝段坝段、11#表孔坝段和 13#发电引水坝段预留混凝土台阶底部高程大都低于下游基坑越冬期可能达到的最高水位, 为避免这些部位越冬期被淹, 致使混凝土温度过度降低, 给来年混凝土温控防裂造成难以克服的困难, 对整个可能受影响的 10#~17#坝段下游均采用填土进行保温。填土采用自卸汽车运料, 用反铲进行摊铺和夯实, 填土顶部高程与越冬仓面高程一致, 顶部宽度不小于  $3\text{m}$ , 10#和 13#坝段混凝土台阶上的填土厚度不小于  $3.0\text{m}$ (工程区最大冻土深度  $239\text{cm}$ )。越冬仓面保温向下游填土顶部延伸距离不小于  $1.0\text{m}$ 。

这些越冬保温措施效果明显, 整个大坝在 2018~2019 年越冬期除在 17#坝段靠近岸坡部位在廊道附近结构突变处以及岸坡接触灌浆止浆坎附近发现 3 条细小裂缝外, 在其他部位未发现裂缝。越冬仓面中部混凝土表面温度基本都在  $15^\circ\text{C}$  以上, 在上下游坝面附近也基本在  $0^\circ\text{C}$  以上。10#坝段底孔预留台阶内部混凝土内部温度在  $12\sim 17^\circ\text{C}$ , 大大减小了后续混凝土施工的温控难度。

### 3.5 老混凝土面上新浇混凝土的温控防裂

在老混凝土面(龄期超过 21 天),尤其是越冬面上浇筑的混凝土层受下层老混凝土的强约束和外界气温的影响,在温控措施不力的情况下,极易因上下层温差、内外温差和混凝土自生体积收缩变形导致的应力过大,从而在上下游坝面发生危害性较大的水平裂缝(沿新老混凝土界面)和劈头裂缝,在坝段顺水流方向的中部的横缝或岸坡附近发生近似平行于坝轴线的裂缝。沿新老混凝土界面的水平裂缝多发生于随后的越冬期。劈头裂缝和其他裂缝多发生在老混凝土上(尤其是在越冬面上)浇筑的薄层混凝土中,尤其是在遭遇寒潮而混凝土临空面未能及时进行妥善临时保温的情况下。

在胶凝材料和混凝土配合比已定的情况下,老混凝土面(尤其是越冬面)上新浇混凝土的温控防裂主要通过优化混凝土浇筑计划和施工组织、控制新老混凝土上下层温差和内外温差来实施:

(1) 优化混凝土浇筑计划和施工组织,尽可能连续浇筑(层间间隔不超过 7 天),在特殊情况下应尽可能控制层间间隔时间不超过 14 天。在无法避免的老混凝土面(例如越冬仓面)上浇筑新混凝土时,应尽可能使新浇混凝土薄层(仓层厚度 1.0m~1.5m)连续(仓层间隔不超过一周,最好控制在 5 天以内)升高 6.0m 以上,避免薄层(厚 3.0m 或更薄)浇筑后长时间间隔。在保证总进度计划的前提下,将部分越冬仓面的上的混凝土浇筑尽可能推迟,以便越冬仓面下部混凝土的平均温度回升到 20℃ 以上,降低上下层温差的控制难度。

(2) 控制新老混凝土层(上下层)温差主要通过控制浇筑温度、采用水管通水冷却和加强新浇混凝土的养护(保温保湿)来实施,具体措施如 3.3 节所述。根据大坝施工期温度应力仿真计算和分析,本工程越冬面新浇混凝土的浇筑温度不宜超过 12℃,越冬仓面以上一定范围(不少于 6.0m 厚)新浇混凝土层的冷却水管的水平间距在上下游坝面附近的富胶凝碾压混凝土和机制变态混凝土范围内从 1.5m 减小到 0.75m,在混凝土浇筑后初期(5 天)加大通水流量(2.0m<sup>3</sup>/h),5 天以后按不超过 1.2m<sup>3</sup>/h 控制。冷却水温在初期按不超过 8℃ 控制,中后期冷却水温采用 12℃~15℃。冷却通水时间,在连续浇筑的情况下,在气温较高季节(6~8 月)为 20 天,在气温较低季节(春秋季节)为 10~15 天。在层间间隔时间超过 10 天的情况下,冷却通水时间在夏季不超过 10 天,在(春秋季节)不超过 7 天或完全取消冷却通水,具体实施随浇筑温度、环境气温和混凝土内部温度变化。

(3) 鉴于工程区在春秋季节寒潮频发,加强混凝土仓面和临空面的临时保温对于控制新浇混凝土尤其是越冬面上新浇混凝土的内外温差,从而降低混凝土开裂风险尤为重要,具体实施如 3.2 节的(6)和(7)条所述。

## 4 结束语

根据工程区气候特点、类似工程经验和大坝施工期和运行期混凝土温度应力仿真计算和分析的结果,制定切实可行的温控指标和有效的温控措施,通过调整混凝土配合比、优化浇筑进度计划和施工组织设计、控制混凝土浇筑温度、优化和加强混凝土水管冷却、加强混凝土施工期(4~10 月)

混凝土仓面和临空面的临时保温、及时进行坝面永久保温、及时进行仓面和其他坝体临空面的越冬保温，使坝体混凝土的基础温差、上下层温差和内外温差得到有效控制，显著降低了大坝混凝土的开裂风险。在过去两年的施工过程中，除个别结构突变部位和岸坡部位发生一些细小裂缝外，未发现大范围的贯穿性裂缝或劈头裂缝，大坝混凝土的温控防裂处于整体可控状态，有效保证了大坝混凝土的质量。

#### 参考文献:

[1] 刘春冬, 王立成, 李学启, 等. 837C-A1 新疆 SETH 水利枢纽工程初步设计报告[R]. 天津: 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2017.

[2] SL319-2005 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[3] NB/T35026-2014 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

#### 作者简介:

**蒋小健**, 男, 汉, 1971年4月8日出生, 四川广安人, 高级工程师, 现任新疆阿勒泰地区萨尔托海水库管理处总工办总工, 从事工程建设与管理工

作。电话: 13899426026 邮箱: 448422595@qq.com。身份证号: 652624197104080016

**秦明豪**, 男, 汉, 1964年11月16日出生, 湖北襄阳人, 高级工程师, 中国水利科学研究院材料所, 从事水利水电工程咨询工作。电话: 13911089365

**王立成**, 男, 汉, 1974年3月27日出生, 河北卢龙县人, 教授级高级工程师, 现任中水北方勘测设计研究有限责任公司坝工所总工, 从事水利水电工程设计工作。电话: 18920259190

寄刊地址:新疆福海县供电公司 蒋新林(电话: 15909060998), 邮编: 836400)