

西藏高海拔复杂气候条件下碾压混凝土筑坝关键技术

向前, 蔡畅, 刘朝建, 路明, 熊涛

(中国水利水电第九工程局有限公司, 贵州省贵阳市 550081)

摘要:西藏高海拔地区气候特点为低气压、昼夜温差大、大风、干燥、太阳辐射异常强烈, 该气候条件对碾压混凝土筑坝施工影响极大。通过开展专项研究, 在配合比设计优化、VC 值动态控制、层间结合、坝体防渗、温控防裂等方面形成了一套针对西藏高海拔复杂气候条件下碾压混凝土筑坝关键技术。解决了碾压混凝土层间结合、温控防裂等关键性技术问题, 可供类似工程参考借鉴。

关键词:高海拔; 复杂气候条件; 碾压混凝土; 筑坝; 关键技术

中图分类号: TV52

文献标识码: A

1 引言

碾压混凝土筑坝技术是世界筑坝史的一次重大突破。从二十世纪六十年代, 国外各国开始碾压混凝土的试验研究, 我国从八十年代初开始探索, 通过引进、消化、吸收再到创新, 在坝体结构、混凝土材料、施工组织、质量检测等方面的研究取得了举世瞩目的成果, 碾压混凝土筑坝技术日趋成熟。我国已建成的碾压混凝土坝近 200 座, 从碾压混凝土重力坝到碾压混凝土拱坝, 从中低坝发展到高坝, 乃至 200m 级的特高坝, 我国碾压混凝土筑坝技术已处于世界前列。但在西藏高海拔复杂气候地区, 碾压混凝土筑坝施工受气候条件影响较大, 筑坝关键技术还有待进一步研究。

2 概述

大古水电站位于西藏自治区山南地区桑日县境内, 为二等大(2)型工程, 以发电为主, 水库正常蓄水位 3447.00m, 相应库容 0.5528 亿 m^3 , 电站坝址控制流域面积 15.74 万 km^2 。多年平均流量 1010 m^3/s , 电站装机容量 660MW。电站枢纽建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水发电系统及升压站等组成。拦河坝为碾压混凝土重力坝, 分为 17 个坝段, 坝体为全断面碾压混凝土, 上游防渗采取变态混凝土+二级配碾压混凝土防渗, 防渗区宽度从下至上厚度依次为 5m、3.5m、2m。坝顶高程 EL.3451.00m, 最大坝高 117m, 坝顶长 385m, 大坝碾压混凝土 93.7 万 m^3 , 常态混凝土 50.5 万 m^3 。

混凝土生产系统按浇筑高峰期 16 万 m^3 /月设计, 具备一冷及制热条件。高温季节混凝土出机口温度要求 $<9^{\circ}C$, 低温季节混凝土出机口温度要求 $>10^{\circ}C$ 。

收稿日期: 2020.8.20

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目经费资助; 西藏高海拔复杂气候条件下碾压混凝土筑坝技术研究 (DJ-ZDXM-2019-16)

作者简介: 向前 (1983-), 男, 湖南凤凰人, 高级工程师, 本科, 从事水利水电工程项目施工技术与管理工。E_mail: 380254858@qq.com

表 1 大古水电站大坝碾压混凝土配合比参数表

序号	强度等级	级配	水泥种类	混凝土种类	坍落度 (mm) /VC 值 (s)	水胶比	砂率 (%)	减水剂	材料用量 (kg/m ³)								表观密度 (kg/m ³)	
									水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	大石	减水剂		引气剂
1	C ₉₀ 15W6F100	三	中热	碾压	1~3	0.55	34	萘系	88	60	100	739	430	573	430	1.28	0.560	2420
2	C ₉₀ 20W8F200	二	中热	碾压	1~3	0.50	38	萘系	93	93	93	805	658	658	/	1.49	0.558	2400
3	C ₉₀ 15W6F100	三	中热	变态	120~140	0.55	32	萘系	142	104	155	687	438	438	584	2.07	0.310	2548
4	C ₉₀ 20W8F200	二	中热	变态	120~140	0.50	36	萘系	151	151	151	746	664	664	/	2.42	0.036	2527

4.2 VC 值动态控制

碾压混凝土 VC 值是碾压混凝土拌合物一项极为重要的指标，直接影响着碾压混凝土的层间结合、抗压强度、抗冻、抗渗等各项性能。碾压混凝土 VC 值极易受高海拔地区特有气候环境影响，应随每天各个不同时段温度、湿度、日照、风速等条件对碾压混凝土的 VC 值进行动态调整。通过在拌和站增加用水量或提高减水剂掺量的方法来对碾压混凝土 VC 值进行动态控制，保证碾压混凝土在摊铺完成后碾压过程中有良好的可碾性、重塑性及良好的层间结合。施工过程中对不同时段、气温环境条件下 VC 值变化情况进行了统计，详见表 2。

表 2 不同时段、气温环境条件下 VC 值变化情况统计表

时段	气温 (°C)	RCC 卸料一定时间后的 VC 值 (s)					经 1hVC 值损失 (s)
		0min	15min	30min	45min	60min	
早	6~14	2.0	2.3	2.9	3.6	4.5	2.5
中	≥25	0.7	1.6	2.8	4.1	5.5	4.8
晚	12~20	1.8	2.5	3.2	4.1	5.0	3.2

实践表明：早晨和夜晚温度相对较低，湿度较高，仓面 VC 值宜控制在 1s~2s；当午后气温 ≥25°C，且受太阳直射时，仓面 VC 值损失较快，初凝时间变短的情况下，VC 值宜控制在 5mm（坍落度）~1s。仓面施工按照不陷碾，VC 值取小值的控制。

4.3 层间结合

4.3.1 层间间隔时间

本工程高温季节通过合理分仓，将坝段分成若干块进行平层铺筑法或者斜层平推铺筑法施工。层间间隔时间在 4h~8h 之间，需要通过混凝土初凝时间的控制来确保层间结合质量。

大坝现场对标准养护条件下以及不同时段、气温环境条件下混凝土凝结时间变化情况进行了统计，详见表 3、表 4。

表 3 标准养护条件下混凝土凝结时间统计表

强度等级	气温 (°C)	标准养护状态下碾压和变态混凝土凝结时间值 (h: min)		备注
		初凝时间 (h:min)	终凝时间 (h:min)	
C ₉₀ 15W6F100	20±2	12:25	16:50	
C ₉₀ 15W6F100 变态	20±2	18:10	25:10	
C ₉₀ 20W8F200	20±2	12:40	16:35	
C ₉₀ 20W8F200 变态	20±2	17:50	24:55	

表 4 不同时段、气温环境条件下碾压和变态混凝土凝结时间值变化情况统计表

强度等级	时段	气温 (°C)	现场仓面内碾压和变态混凝土凝结时间值(h:min)		备注
			初凝时间(h:min)	终凝时间(h:min)	
C ₉₀ 15W6F100	早	6~14	13:50	17:30	
	中	≥25	8:10	11:15	
	晚	12~20	11:05	14:35	
C ₉₀ 15W6F100 变态混凝土	早	6~14	19:05	25:45	
	中	≥25	14:40	17:50	
	晚	12~20	16:35	19:20	
C ₉₀ 20W8F200	早	6~14	14:40	16:50	
	中	≥25	8:15	11:30	
	晚	12~20	11:20	14:40	
C ₉₀ 20W8F200 变态混凝土	早	6~14	19:35	25:55	
	中	≥25	14:50	16:45	
	晚	12~20	16:55	19:40	

4.3.2 调整冷却水管铺设时间

冷却水管铺设的层面，层间间隔时间往往较长，不利于层间结合。故冷却水管在夜间或者上午铺设，避开下午高温及太阳直射时段，施工冷却水管层碾压混凝土，冷却水管埋设高程可在设计布置高程上下 30cm 范围内实际调整。

4.3.3 应用智能碾压监控系统

在碾压混凝土浇筑过程中对碾压遍数、碾压轨迹、行进速度等各项参数实时监控，系统将对不合格参数进行警示反馈，实现了碾压混凝土浇筑质量的精准控制。结果表明：智能碾压监控系统对于碾压混凝土浇筑质量控制起到了关键性的作用，极大提升了碾压混凝土施工质量可靠度。

4.3.4 条带及时覆盖

高温及太阳直射时段，碾压后的条带及时采用三防布进行覆盖保湿，直至上一层碾压混凝土覆盖时再揭开。

4.4 温控防裂

4.4.1 半成品温控措施

粗骨料、砂、加冰量是影响混凝土出机口温度的主要因素，在混凝土生产过程中，需严格控制好粗骨料的风冷效果和尽量加冰或加制冷水。根据 2019 年的数据统计，粗骨料或砂温度上升 1.0°C，碾压混凝土温度上升 0.30~0.52°C；每加 1.0Kg 冰，碾压混凝土温度降 0.17~0.20°C。

表 5 碾压混凝土原料温度变化及加冰量对混凝土出机口温度的影响

材料名称		粗骨料温度变	砂温度变化	水泥温度变	加制冷水	加冰 (Kg)
		化 (°C)	(°C)	化 (°C)	(Kg)	
C ₉₀ 15W6F100 (三级配碾压)	混凝土温度变化 (°C)	0.513	0.334	0.0305	0.0316	0.175
	C ₉₀ 20W8F200 (二级配碾压)	混凝土温度变化 (°C)	0.513	0.334	0.0305	0.0316

4.4.2 运输过程中温度回升控制

(1) 选择合理的入仓方式，减少转运。本工程坝体三分之二的碾压混凝土均采用自卸汽车直接入仓，确保入仓强度的同时减少了温度回升。

(2) 运输道路宜采用双车道，不具备双车道入仓条件的在合适位置设置错车道并安排专人调度指挥，以提高混凝土运输车辆的效率，缩短混凝土运输及等待卸料时间。

(3) 自卸汽车、满管等混凝土运输设备全部采取在外壁贴 3cm 厚橡塑海绵进行保温，混凝土运输自卸车顶部加设保温活动式遮阳棚。

拌合站至碾压混凝土仓面运输距离 1.6km，通过以上措施，出机口温度至入仓温度的回升能够控制在 2℃ 以内。

4.4.3 浇筑过程中温度回升控制

(1) 振捣完成的变态混凝土和碾压后的条带及时采用彩条布或薄膜覆盖保温保湿，在下一层混凝土覆盖前揭开。

(2) 采用喷雾机、冲毛机对仓面进行喷雾，形成局部小气候，对已完成碾压进行覆盖的区域同样要进行喷雾。

(3) 大坝悬臂翻升钢模板背部粘贴 10cm 厚聚苯乙烯板进行模板保温。

通过以上措施，入仓温度至浇筑温度的回升能够控制在 2℃ 以内。

4.4.4 混凝土成型后保温保湿

(1) 混凝土浇筑完毕后，表面采用土工布、彩条布或塑料薄膜进行洒水覆盖养护，使混凝土表面保持长时间湿润，且在高温季节起到很好的散热效果。

(2) 拆模选择在白天高温时段进行，拆模一块区域，保温保湿工艺及时跟进。坝体横缝面拆模后采用橡塑海绵保温，根据坝体上升开仓前才能沿高程逐段拆除。上下游立面养护结合越冬保温措施一次成型。

(3) 永久面保温采用喷水花管+PC 薄膜+橡塑海绵+三防布+定制压条+螺栓固定的新型保温保湿工艺。确保混凝土内外温差 $\leq 16^{\circ}\text{C}$ ，混凝土表面湿度可达到 95% 以上，确保了混凝土表面保温保湿效果，有效避免混凝土表面温度裂缝及干缩裂缝的发生。同时材料均属于柔性材料，能够搭接；且采用压条及螺栓固定，强风条件下也不会导致脱落；拆除后无胶水附着物，外观美观，不需要对坝面二次清理；各部件材料回收方便，能够二次利用，实现了节能环保。

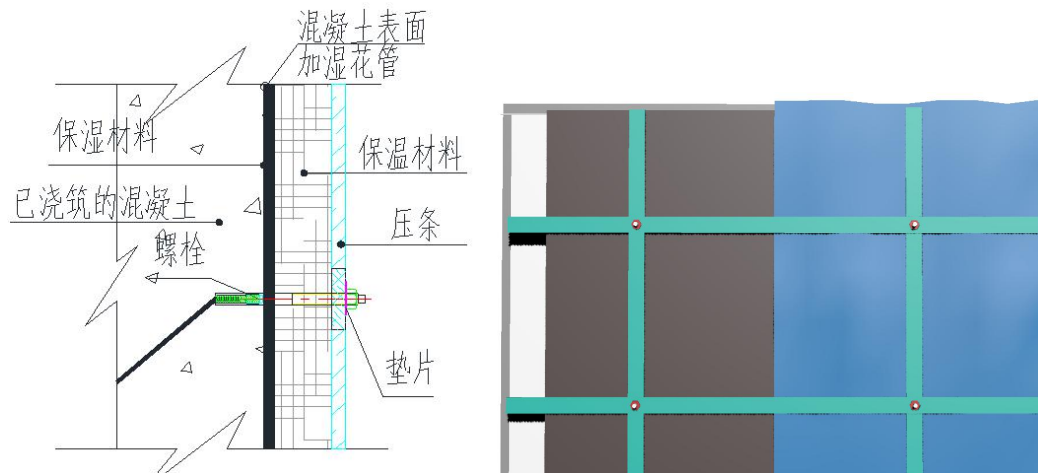


图 2 压条式保温保湿工艺示意图

4.4.5 智能通水冷却，降低混凝土内部温度

冷却用水水池及干、支管均采用 3cm 厚橡塑海绵保温材料包裹，采用雪山融水作为坝体冷却用水，雪山融水高温季节水温 5~10°，低温季节水温 1~5°，大坝在越冬期间气温达到 0℃ 以下时，停止通水。

在冷却水管铺设时，通过坝后设置预留键槽与预埋 PPR 管，可保证通水过程不受施工干扰，在水管铺设之后第一时间实现通水，而后利用智能温控系统对大坝混凝土进行智能通水，削弱碾压混凝土强度增长的温度峰值来实现大坝温控防裂。

对上下游变态混凝土区域的冷却水管进行适当的加密。

根据系统内部降温速率评价信息，降温速率整体控制较好，整体控制在 0.3℃~0.5℃/d 内，且根据内部温度计监测统计成果，总体合格率达 90% 以上。

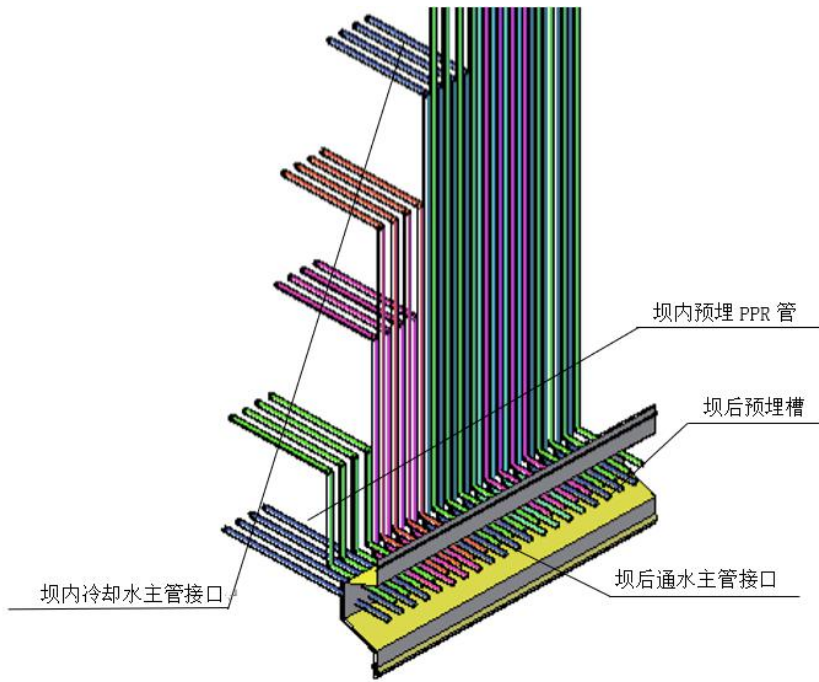


图3 预留键槽实施效果图

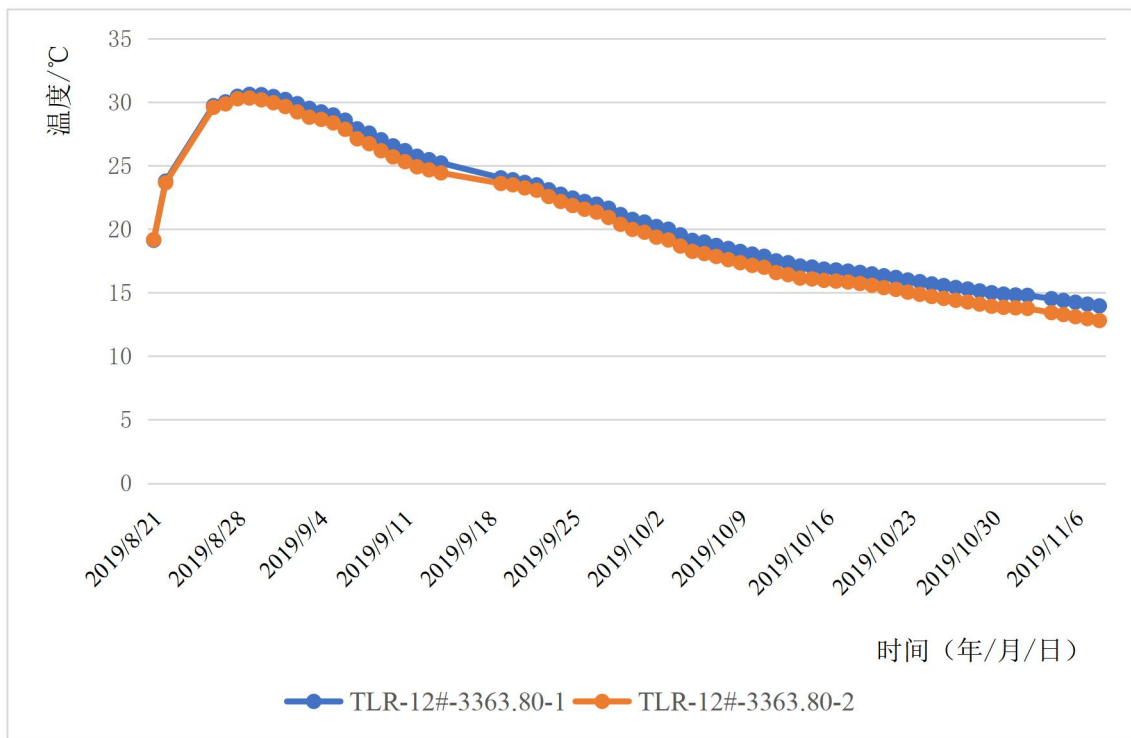


图4 2019年12#坝段 EL.3363.80m 智能温控效果监测

4.4.6 混凝土绝热温升反演

基于智能温控系统的数据,对绝热温升进行反演,对已经浇筑的混凝土的温度过程进行反馈,观察计算温度过程和实测温度是否吻合,为应力的准确预测评估提供依据。

三级配碾压 C₉₀15W6F100 的绝热温升为:

$$\text{反演值: } T = \frac{18.57t}{t+4.587} \quad (1)$$

$$\text{设计值: } T = \frac{17.57t}{t+3.286} \quad (2)$$

二级配变态 C₉₀20W8F200 的绝热温升为:

$$\text{反演值: } T = \frac{28.08t}{t+3.20} \quad (3)$$

$$\text{设计值: } T = \frac{23.08t}{t+3.498}; \quad (4)$$

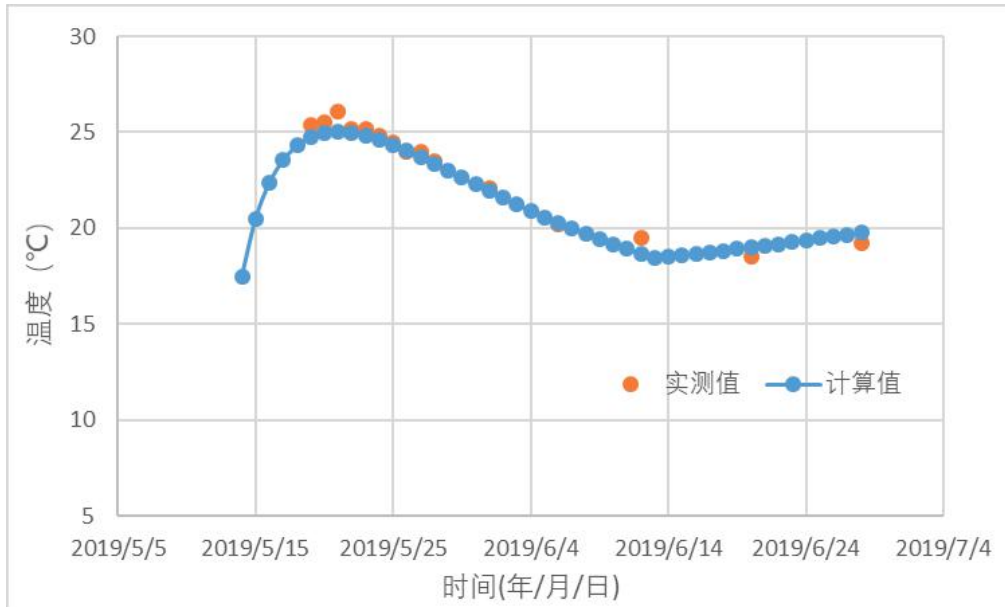


图 5 三级配碾压 C9015W6F100 内部温度实测值与计算值对比

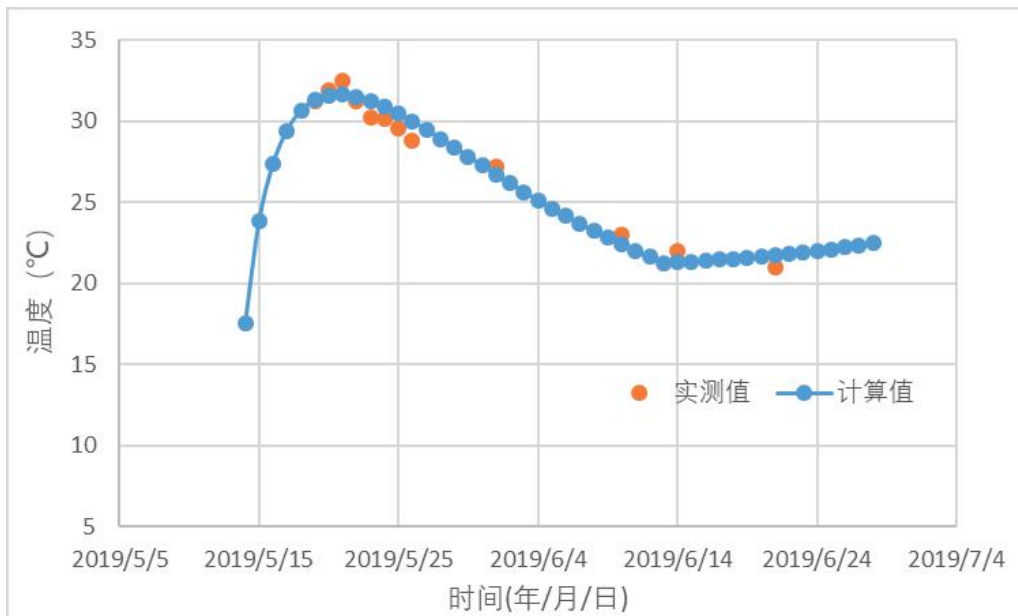


图 6 二级配变态 C9020W8F200 内部温度实测值与计算值对比

结果表明：采用反演参数计算的温度曲线与实测温度曲线吻合良好。

4.4.7 越冬保温

混凝土在冬歇期（12月~次年2月）暂停施工，越冬保温材料按照坝体上游下游表面、坝体侧面、坝体长间歇面、坝体孔洞，根据气候特征及保温要求进行措施划分，并与技术要求措施进行对比，见下表：

表 6 越冬保温措施与原技术要求对比表

部位	原技术要求措施	优化后措施	备注
坝体上下游表面	表面粘贴 5cm 厚聚苯乙烯板	喷洒水管+PC 薄膜+3cm 橡塑海绵+扁钢+三防布	
坝体侧面	表面粘贴 3cm 厚聚苯乙烯板	喷洒水管+PC 薄膜+3cm 橡塑海绵+扁钢+三防布	转角处搭接
坝体长间歇面	15cm 厚棉被	喷洒水管+PC 薄膜+6cm 橡塑海绵（纵横向各一层） +三防布+脚手架管及扣件压重	1.5m
坝体孔洞	3cm 厚聚苯乙烯板封闭	5cm 厚保温门帘	

说明：预埋花管及 PC 薄膜主要功能为保湿。

三防布主要功能为防止大风、降雨、降雪融水进入坝体内，同时具备防火功能，避免工区火灾事故的发生。

表面压重：由于低温季节峡谷风大，保温保湿材料容易被风掀开，影响保温保湿效果，故将脚手架管和扣件连接成整体行成 2×2m 的网格状，该压重方式安拆方便。

2019 年冬歇期提前在大坝上下游表面、坝段立面及越冬水平面布置了 17 台温湿度记录仪用于越冬保温效果监测，典型部位实测效果如下：

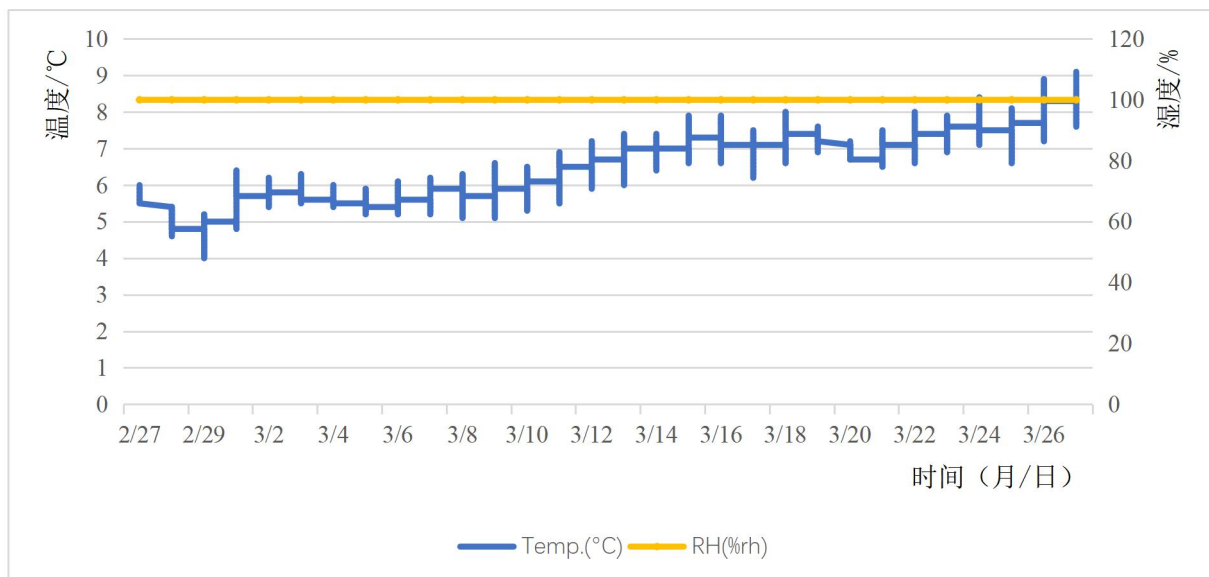


图 7 6#坝段混凝土表面温湿度数据曲线图

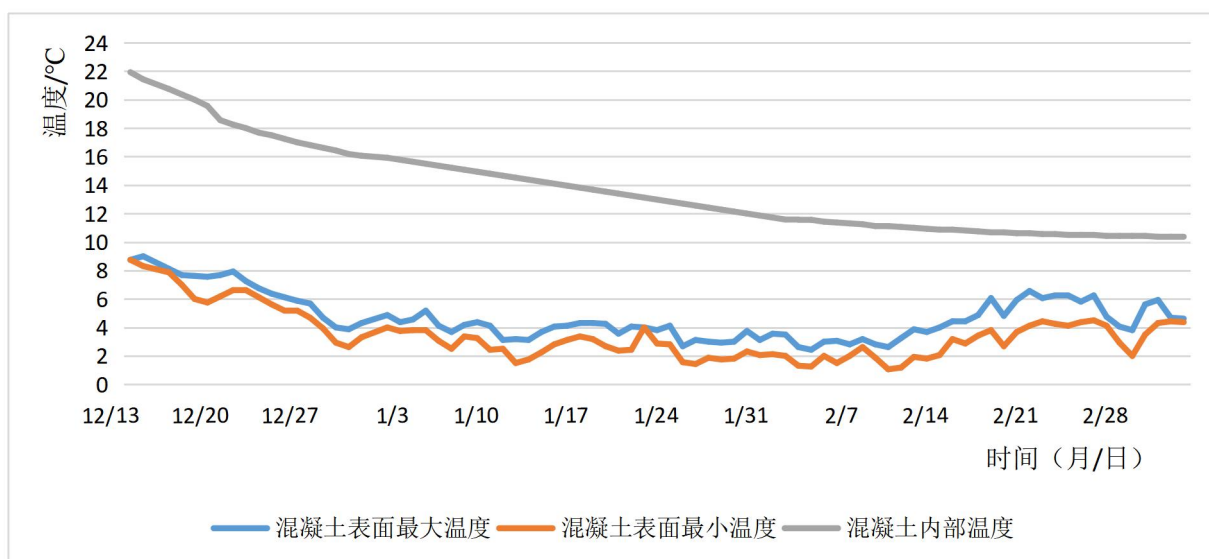


图 8 7#坝段混凝土内部温度、表面温度、大气温度数据曲线图

监测成果表明,混凝土表面温湿度及温度梯度呈现较好的效果,均满足设计温控指标,避免了表面干缩裂缝、温度裂缝等的产生,采用该越冬保温方式效果良好。

4.5 坝体防渗

(1) 上下游防渗区采用机制变态混凝土,大幅提高工效,也更利于保证质量;辅以定制的振捣台车振捣,降低人为因素及质量风险。

(2) 对于二级配区域,在上层混凝土摊铺前,层间铺撒 2~3mm 净水泥浆,确保二级配防渗效果。

(3) 越冬面上游增设一道铜止水,并与横缝铜止水相连接。

(4) 坝前表面涂刷防渗涂料,增强坝面防渗效果。

(5) 坝前冲砂底孔以下高程进行脱泥料回填,有利于坝前强约束区混凝土温控和坝体防渗。

4.6 快速施工技术

4.6.1 选择合理的入仓方式

大坝 EL3334m~EL3396m,总计 60 万 m^3 ,即三分之二的碾压混凝土均采用自卸汽车直接进入仓,确保了入仓强度,大坝 EL3396m 以上采用 $\phi 800mm$ 满管入仓,仓内自卸汽车转运。

4.6.2 坝内结构优于坝体先行上升

采用先上升爬坡预制廊道、集水井、交通井等坝内结构以降低碾压混凝土施工仓面的施工干扰;交通井采用预制装配式楼梯、孔槽部位采用液压定型模板,加快施工进度。

4.6.3 混凝土分区调整

碾压混凝土施工的最大优点为能够实现坝体快速上升,但对局部区域采取常态混凝土施工更加有利,如廊道之间等空间较小区域,调整为同等级低塌落度常态混凝土施工。

4.6.4 翻转模板连续施工

具备翻转模板施工的仓面尽量采用翻转模板进行施工,提升大坝整体施工进度,右岸挡水坝段连续上升达到了 38m。

5 结语

从 2019 年 3 月 12 日首仓碾压混凝土浇筑以来,完成大坝混凝土浇筑 114 万 m^3 ,左岸挡水坝段已经到顶,右岸挡水坝段即将到顶,在层间结合、温控防裂等方面均取得了成效。对已施工的碾压混凝土随机进行了压水试验,透水率在 0~0.33lu 之间,满足设计技术要求 $<0.5lu$ (二级配防渗区)及 1.0lu (三级配坝体内部)的要求,大坝外表面光洁,保温保湿效果佳,越冬保温后揭被检查无危害性裂缝,坝体整体质量优良。

作者简介:向前(1983—),男,湖南凤凰人,高级工程师,本科,从事水利水电工程项目施工技术与管理工
作;E-mail:380254858@qq.com

蔡畅(1992—),男,重庆巴南人,工程师,本科,从事水利水电工程项目施工技术与管理工
作;E-mail:980883042@qq.com

刘朝建(1990—),男,四川内江人,工程师,本科,从事水利水电工程项目施工技术与管理工
作;E-mail:412406540@qq.com

路明(1989—),男,山东新泰人,助理工程师,本科,从事水利水电工程项目试验检测与管理工
作;E-mail:245937416@qq.com

熊涛(1996—),男,贵州毕节人,助理工程师,本科,从事水利水电工程项目施工技术与管理工
作;E-mail:352642656@qq.com