

水库大坝碾压混凝土温控技术研究

王超

哈密市水利建设与安全中心, 新疆 哈密 839000

[摘要]严寒干旱地区碾压混凝土重力坝温度控制面临着气温变幅大、寒潮频发、蒸发强烈等诸多严峻的考验。本文以新疆哈密代尔昆代水库工程为例, 从出机口温度控制、施工全过程温控、监测反馈三个方面对可落地的温控技术体系进行阐述。采用加冰拌和、冷水供给的方法, 在骨料不预冷的情况下, 每 m^3 混凝土加冰 32kg、用 5°C 冷水拌和, 出机口温度降到 16.39°C , 满足 $\leq 16.5^\circ\text{C}$ 的要求。施工阶段以通水冷却为主, 强约束区用 10°C 冷却水连续通水 15d, 流量 $20\sim 25\text{L}/\text{min}$, 降温速率控制在 $0.5\sim 1.0^\circ\text{C}/\text{d}$ 。配合仓面喷雾、表面保温和永久聚氨酯保温层, 形成了一条从拌和、运输、浇筑到养护的完整温控链。监测采取分层布点、分时段取样的办法, 从而实现温度场的即时分析并加以调节。

[关键词]碾压混凝土; 温度控制; 出机口温度; 通水冷却; 实时监测

DOI: 10.33142/hst.v9i7.20254

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

Research on Temperature Control Technology for Roller Compacted Concrete of Reservoir Dam

WANG Chao

Hami Water Conservancy Construction and Safety Center, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract: The temperature control of roller compacted concrete gravity dams in extremely cold and arid regions faces many severe challenges such as large temperature fluctuations, frequent cold waves, and strong evaporation. This article takes the Hami Daier Kundai Reservoir project in Xinjiang as an example to elaborate on the practical temperature control technology system from three aspects: outlet temperature control, temperature control throughout the construction process, and monitoring feedback. Using the method of mixing with ice and supplying cold water, without pre-cooling the aggregate, 32kg of ice is added per m^3 of concrete and mixed with 5°C cold water. The outlet temperature drops to 16.39°C , meeting the requirement of $\leq 16.5^\circ\text{C}$. The construction phase is dominated by water cooling. The strongly constrained area is continuously watered with 10°C cooling water for 15 days, with a flow rate of $20\sim 25\text{L}/\text{min}$ and a cooling rate of $0.5\sim 1.0^\circ\text{C}/\text{d}$. A complete temperature control chain from mixing, transportation, pouring to maintenance is formed with the cooperation of warehouse surface spray, surface insulation and permanent polyurethane insulation layer. The monitoring adopts the method of layered sampling and time-based sampling to achieve real-time analysis and adjustment of the temperature field.

Keywords: roller compacted concrete; temperature control; outlet temperature; water cooling; real-time monitoring

引言

碾压混凝土筑坝由于施工速度快、水泥用量少, 在水利工程中得到了广泛的应用, 但是大体积混凝土的温度裂缝问题一直是个技术难题。代尔昆代水库位于新疆哈密伊吾县, 最大坝高 63m, 坝型为碾压混凝土重力坝。工程区多年平均气温为 3.8°C , 7 月平均气温为 18.7°C , 极端最高温为 32.6°C , 极端最低温为 -31.2°C , 冻土深度为 2.2m, 年降水量为 97.7mm, 蒸发量为 2113.1mm, 大风、气温骤降事件较多。由于气候特征的影响, 混凝土基础的温差、

内外温差以及上下层温差的控制难度大大增加。工程只在每年的 4~10 月份进行混凝土浇筑, 11 月至次年 3 月为越冬期停工, 混凝土必须在较短的施工窗口内完成浇筑并承受严寒考验。

1 碾压混凝土温控难点与现场主要问题

代尔昆代水库坝址区为 U 形河谷, 河床覆盖层为强透水卵砾石层, 基岩为深灰色凝灰岩。坝体混凝土分区复杂, 有基础垫层常态混凝土、坝体内部三级配碾压混凝土、上下游坝面变态混凝土和溢流面高强常态混凝土等^[1]。不

同的部位温控标准不一样,强约束区最高温度 $\leq 23.5^{\circ}\text{C}$,基础温差 $\leq 14.5^{\circ}\text{C}$;弱约束区最高温度 $\leq 26.5^{\circ}\text{C}$,基础温差 $\leq 16.5^{\circ}\text{C}$;上下层温差在基础约束区不得大于 15°C ,内外温差不得大于 19°C 。这些标准在气候恶劣的情况下很难实现。

现场主要问题有三个。其一,原材料的初始温度高。实测夏季骨料、砂约 18.7°C ,水泥到场温度可达 60°C ,粉煤灰约 30°C ,拌和水 10°C 以上,不采取温控措施自然生产难以满足出机口温度要求。第二,施工期气温变化大,5~9月日均气温大于 25°C ,10月夜间气温接近 0°C ,混凝土运输浇筑时温度上升无法完全避免。第三,越冬期长达五个月,低温、大风、极低负温同时存在,如果保温不及时,内外温差超过限值导致已经浇筑的混凝土出现冻害和裂缝风险极大。这就需要温控方案全链条覆盖、多手段协同。

2 混凝土出机口温度控制

2.1 原材料预冷措施

经热力学计算,本工程没有设置骨料风冷系统,通过采用加冰、加冷水拌和的方式进行降温,配备一台 432t/d 的集装箱冷水机组提供 5°C 冷水,同时设有 60t/d 集装箱式制冰机和 17t 储冰库。按典型碾压三级配合比计算:水 80kg ,水泥 64kg ,粉煤灰 187kg ,砂 677kg ,小石 443kg ,中石 590kg ,大石 443kg 。砂含水率为 4.5% ,小石含量为 0.3% 。骨料、砂温度 18.7°C ,水泥 60°C ,粉煤灰 30°C 。拌和用 5°C 冷水,加 -5°C 片冰 $32\text{kg}/\text{m}^3$,冰溶解热利用率取 0.9 。经过热平衡计算得出出机口温度为 16.39°C ,满足不大于 17.2°C 的要求。

骨料未预冷时,只依靠加冰、加冷水就达标,片冰的相变吸热起着决定性的作用。 3kg 冰(-5°C)融化吸收的热量约为 1033.5kJ ,可以抵消水泥、骨料带入的热量^[2]。同时在骨料堆场搭设遮阳凉棚并定时洒水,控制温升。水泥、粉煤灰储罐涂刷白色反光漆、外包白帆布,罐体下部缠绕硬质塑料管通循环水降温,可使胶凝材料温度比暴晒条件下降低 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 配合比优化设计

碾压三级配混凝土胶凝材料总量为 $251\text{kg}/\text{m}^3$,水泥用量仅为 64kg ,粉煤灰掺量为 187kg ,掺合料比例大于 74% 。高粉煤灰掺量大幅度减少水泥水化热总量,推迟水化放热峰值出现时间,使内部温升更加平缓。骨料总量为 $2153\text{kg}/\text{m}^3$,粗骨料所占比例大,利用其体积稳定性、热容量大的特点来降低单位体积水化温升。外加剂选用高效缓凝减水剂,使初凝时间控制在 $12\sim 16\text{h}$ 之间,既满足大

仓面连续浇筑的要求,又推迟水化放热高峰到浇筑后次日低温时段,利用夜间自然散热降低内部最高温度。

3 施工全过程温控措施

施工全过程温控体系包括拌和、运输、仓面浇筑、通水冷却、表面保温养护等环节,如图1所示。

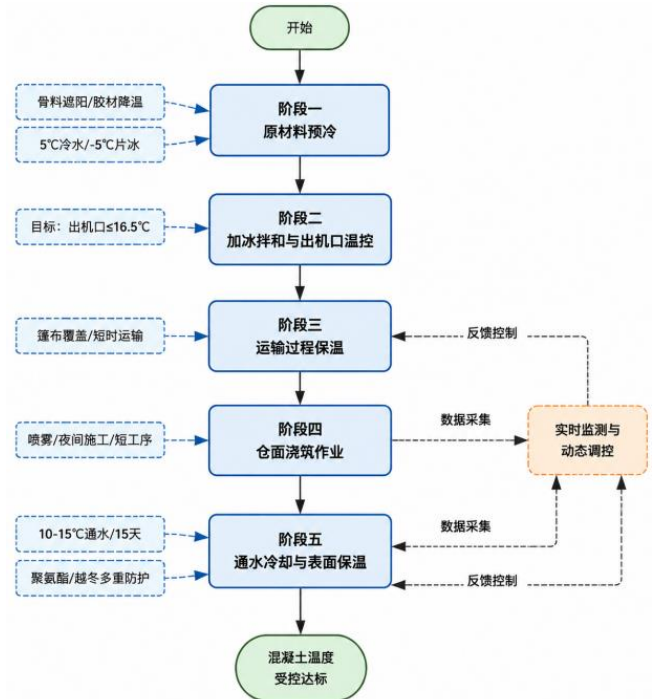


图1 代尔昆代水库碾压混凝土施工全过程温控体系流程图

3.1 拌和与运输过程保温

拌和站出机口温度达标只解决了源头问题,混凝土在运输过程中温度回升也要严格控制。工程把混凝土运输罐车、自卸车顶面全部覆盖上遮阳保温篷布,减少太阳直接照射,降低与热空气的对流换热。运输路线根据仓面位置优化,减少场内运输距离,碾压混凝土从出机到碾压完成总时间控制在2小时以内。高温季节缩短到1.5小时。掺加片冰的混凝土,运输时间越短,温度回升越小。拌和用水管道、冷水机组均用保温层包裹,冷水、片冰输送管路尽量短直,减小沿程冷量损失。储冰库靠近拌和站布置,片冰用密闭螺旋输送,防止与环境空气接触吸湿结块或者融化。

3.2 仓面浇筑温控作业

仓面作业是混凝土温度回升最快的环节,也是施工温控的重点。当日平均气温达到或者超过 25°C 的时候,工程优先安排在夜间和早晚低温时段浇筑,避开10时至16时的高温时段。仓面设置4台喷雾系统、2台雾炮枪,连续对浇筑区进行喷雾保湿。细密水雾的蒸发吸热可使仓面

上方形成低温高湿的微气候区,使仓面环境温度降低 3~5℃。混凝土收仓后立即用保温被、彩条布覆盖表面,减缓表面的热量散失或者外界的热量侵入。

浇筑层厚度及间歇时间的控制也会对温度场分布造成影响。强、弱约束区浇筑层厚为 1.5m,自由区为 3.0m。层厚的限制防止一次浇筑体积太大造成内部热量集中。强约束区春夏季间歇期为 7 天,秋季 5~7 天,最长不超过 14 天;自由区统一为 7 天,最长不超过 21 天。合理的间歇期既可以保证层间结合质量,又可以利用层面散热降低下部混凝土的温度。

高温时段必须连续施工时,采用“随平仓、随碾压、随覆盖”的短工序作业法,减小每一循环的暴露面积和暴露时间。平仓后立即碾压,碾压完一块就覆盖一块,使混凝土与新浇层的热量交换降到最低。

3.3 通水冷却实施

通水冷却是大坝温控的主要手段,主要起到削减水化热温峰、控制降温速度、满足基础温差限值的作用。工程在每仓混凝土中预埋 HDPE 塑料冷却水管,外径 32mm,壁厚 2mm,导热系数不小于 1.66kJ/(m·℃)。水管水平、垂直间距均为 1.5m,蛇形布置,走向平行于坝体横缝,单根管路长度不大于 250 米,不得穿过横缝、孔洞。单仓最多只设 2 根支管,同一干管接头不超过 6 个。管道铺设完成以后,浇筑前 30min 通水试压,观察有无堵塞和渗漏,验收合格后方可开仓。

通水参数按约束区类型分不同。强约束区通水温度为 10℃,流量 20~25L/min,连续通水 15 天。弱约束区和自由区的通水温度均为 15℃,流量相同,时间均为 15 天。水源取自上游河床砂砾层潜水,在高温时段配合加冰降温。每 24h 变换一次水流方向,保证混凝土均匀冷却。在降温速率控制上要求每天降温 0.5~1.0℃,严禁超速降温。强约束区的总降温幅度为 6~8℃,自由区为 8~10℃。当降温幅度达不到要求的时候,增加通水时间直到达到目标温差为止。通水后用 M40 水泥浆回填灌浆,切除外露管口。

该套通水冷却方案把温差、速率这两个指标一起纳入控制,避免了以往只考虑降温幅度而忽略降温速率造成的冷击裂缝^[3]。15 天的通水周期同约束区混凝土水化放热规律相吻合,大体上涵盖了温升及早中期降温时段,给后续的自然冷却赋予了平缓的温度过渡。

3.4 表面保温与养护

混凝土表面保温、养护贯穿施工期和运行初期。混凝土浇筑完毕后立即进行养护,侧面用多孔悬挂水管洒水,顶面用自动喷水器保湿,养护时间不少于 28 天。上下游

坝面为永久暴露面,用 10cm 厚硬泡聚氨酯喷涂保温。施工前用高压水枪对基层进行清洗,用丙乳砂浆修补孔洞、错台,保证基面干燥、清洁。分层喷涂控制单层厚度不大于 1.5cm,最终得到密度不小于 45kg/m³、导热系数不大于 0.024W/(m·K)的保温层,闭孔率不小于 92%,粘接强度不小于 0.5MPa。该层永久保温结构会一直减小坝面与外界之间的热交换速度,削减由于气温急剧下降或者年温差造成的表层拉应力。

越冬仓面是保温最难的部位。停工越冬层面有三层防护体系,从上到下分别是三防帆布、0.6mm 聚乙烯薄膜、5 层 2cm 厚棉被和 2 层 8cm 厚聚乙烯保温板。帆布用钢管或者钢筋压牢,防止大风吹揭。对于龄期小于 28 天的混凝土,再加一层聚乙烯薄膜保湿。该保温体系等效热阻相当于 80cm 以上土层覆盖,可以保证越冬时混凝土本体温度不小于 3℃,防止深层冻害。

气温骤降应急时所有龄期不到一天的外露面全部用 5cm 厚的保温被覆盖。拆模时间严格控制,混凝土浇筑完成 7 天内不得拆模,孔口、廊道等空腔部位及时封闭防止冷风进入^[4]。低温环境下,环境温度降到零摄氏度以下时,龄期不足 21 天的混凝土层面必须保温,环境温度低于-3℃时停止碾压混凝土浇筑作业。

4 温度监测与反馈调控

4.1 监测仪器与测点布置

温度监测是保证各项温控措施正确实施的先决条件。工程按坝段、浇筑层分区布置测温点,在强约束区、孔口周边 10 米范围内加密。每个仓面设表层、中层、底层三个深度的测温点,测量混凝土内部温度、表面温度、环境气温。测温仪器以数字式混凝土测温仪为主,配合便携式红外测温仪快速得到表面温度。冷却水管的进出水口装有流量计、温度计,可以随时记录通水流量及水温。

4.2 实时数据采集

根据龄期和温控阶段来确定数据采集频次。混凝土浇筑前后 7 天是水化温升高峰期,每 2h 测温一次。7~15 天进入冷却降温阶段,每 4h 测温一次。15 天内每天测温两次,直到温度趋于稳定为止。遇气温骤降、大风、大雨等恶劣天气时,全部测点改为每小时一次。所有数据由专人记录,填写混凝土温度监测记录表,包括浇筑温度、入仓温度、内部温度、表面温度、通水温度、流量、环境温度等。

4.3 温度场分析与预警

根据现场技术人员每天对仓面温度变化趋势的分析,实时采集数据。主要看三个指标,混凝土最高温度是否超过允许值,内部和表面的温差是否大于 19℃,降温速率

是否超过每日 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 的安全范围。当任何一个指标接近限值的 80% 时就发出警报, 由技术负责人通知。工程中引入智能温控系统, 用预埋在结构里的传感器实时采集温度数据, 通过软件平台绘制出温度云图和历时曲线, 从而对温度场发生异常的区域及变化趋势作出判断, 避免了由于人工观察温度数据造成的滞后^[5]。

4.4 温控措施动态调整

监测数据的价值最终要反映到温控措施的及时调整上来。当内部温度超过正常范围的时候, 迅速增大冷却水的流量并降低冷却水的温度, 如果不能将温度降至正常值, 可以延长冷却时间。内外温差超过规定值时, 在混凝土表面加设保温被或薄膜覆盖, 减小表面散热。降温速率过快时, 立即减小通水流量或者提高通水温度, 使降温曲线趋于平缓。冷却管堵塞或者漏水时, 立即关闭该支管的阀门, 泄压后再疏通或者更换, 处理完毕后方可恢复正常通水。

气温骤降预警到来时, 立即准备好保温被、薄膜, 短时间内把所有的外露面都覆盖起来。高温暴晒天气时开启全部仓面喷雾、遮阳设施, 把浇筑时间调整到夜间, 把突发气候给温度场造成的冲击控制在可接受范围内。依靠实时监测形成的动态反馈机制, 温控措施由原来的静态设定变成随着工况变化而进行的闭环调节, 从而保证混凝土温度一直处在标准范围内。

5 结束语

代尔昆代水库碾压混凝土重力坝温控实践证明, 在严寒干旱、大温差地区, 依靠加片冰、冷水拌和可以在骨料

不采取深度预冷的情况下将出机口温度控制在 16.5°C 以内。施工阶段以通水冷却为主, 配合仓面喷雾、运输保温、表面保温、越冬等各个方面的防护, 形成了一个完善的温控体系。由于监测系统具有实时反馈和动态调整的功能, 所以温控更加准确、可靠。本项目强约束区和弱约束区混凝土最高温度、基础温差、内外温差均符合设计要求, 无危害性温度裂缝。该技术方案系统性好、操作方便, 对同类气候区碾压混凝土坝工程有借鉴意义。未来可以继续对骨料高效预冷、智能化通水调节、大体积混凝土温度应力仿真分析等进行研究, 从而提高温控效果和经济效益。

[参考文献]

- [1]水蒙琪.某水库大坝碾压混凝土温控防裂技术举措探讨[J].应用能源技术, 2025(5):82-84.
 - [2]李兴朝,何起,曹虎.大坝碾压混凝土温控技术及裂缝处理措施[J].水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2):135-139.
 - [3]周宸光,苗英琳,白宇龙.水库大坝施工大体积混凝土裂缝产生机制及防控措施研究[J].江西建材, 2026(4):385-388.
 - [4]杨逸江.高温环境下水利工程大坝混凝土温控与裂缝控制技术研究[J].水泥, 2026(1):96-98.
 - [5]陈文,陈广森,何顺德.T 水电站碾压混凝土大坝智能温控一期通水效益分析[J].中国高新科技, 2025(17):61-63.
- 作者简介: 王超(1982—), 男, 大学本科学历, 毕业于新疆农业大学水利水电工程专业, 目前就职于哈密市水利建设与安全中心, 副主任, 副高级工程师。