

水利水电工程混凝土温度裂缝控制技术

邓伦松

四川豪之宏建设工程有限公司 四川成都 610074

摘要: 混凝土温度裂缝是水利水电工程建设中常见的一种质量问题,它的产生是由水泥水化放热、外界环境温度差、结构约束等因素共同起作用而造成的。温度裂缝一旦形成,会对结构的整体性和防渗性造成不良影响,严重的时候还会缩短建筑物的设计使用年限。本文从温度裂缝的产生机理入手,对材料选择和配合比设计、施工过程温控措施、养护及表面保护方法、现代监测技术在温控管理中的应用进行了系统的整理。从材料角度主要研究了低热水泥、粉煤灰掺合料、聚丙烯纤维对于混凝土早期温升和抗裂性能的影响;从施工角度提出了预冷骨料、通水冷却、分层浇筑等可操作的工程温控方法;从监测角度介绍了分布式光纤测温与实时反馈控制的智能温控系统的工作原理。各项技术措施互相配合,可使混凝土内外温差控制在规范允许的范围内,减少温度裂缝出现的概率,给同类工程提供借鉴。

关键词: 水利水电工程;温度裂缝;温控措施;混凝土配合比

水利水电工程中大体积混凝土应用十分广泛,坝体、底板、闸墩等结构构件的单个浇筑量大多在几百甚至数千立方米。混凝土浇筑之后,水泥水化反应不断放出热量,使混凝土内部温度迅速上升,而表面混凝土受环境气温的影响散热较快,造成内外温度差。当温度应力大于混凝土早期抗拉强度时,就会出现裂缝。根据国内多项工程调查可知,大体积混凝土温度裂缝在各类混凝土裂缝中占60%~80%,是造成质量事故的主要原因。现行大体积混凝土施工标准GB50496规定混凝土内外温差不得大于25℃,浇筑体表面与外界温差不大于20℃。围绕上述控制目标,本文对材料选用、施工工艺、养护管理和智能监测等各个方面的温控技术进行了梳理和分析,希望能够给工程实践提供切实可行的技术支持。

一、混凝土温度裂缝的形成机理

(一) 水化热与温升规律

普通硅酸盐水泥在水化时释放出的热量为330~380kJ/kg,在浇筑后的3~7d内全部释放出来,使混凝土芯部温度明显升高。以典型坝块浇筑层厚1.5m为例,不采取降温措施时,芯部峰值温度会比浇筑温度高25~45℃。温升速率和水泥细度、矿物组成有关,C₃A、C₃S含量越高,早期水化放热越大,温升峰值越早出现。达到峰值之后,混凝土慢慢冷却收缩,在受到地基或者老混凝土的约束时,就会出现较大的拉应力^[1]。

(二) 约束条件与应力分析

温度应力的由温度变化量、混凝土弹性模量、线膨胀系数、外部约束程度等共同作用的结果。底板或者坝块底部受地基约束时,约束系数R可以取0.6~0.8;上部浇筑层受下层老混凝土约束时,R值一般在0.3~0.5之间。以线膨胀系数 $\alpha=1.0\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、弹性模量 $E=28\text{GPa}$ 的C30混凝土为例,在完全约束下,温度应力 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 时理论应力可达5.6MPa,大大超过混凝土早期抗拉强度(1.5~2.5MPa),因此裂缝控制要从降低温差、减少约束两方面入手。

二、材料优选与配合比设计

(一) 低热水泥与矿物掺合料

选用低热硅酸盐水泥(符合GB/T200标准),是降低混凝土水化热最直接的方法。低热水泥7d水化热不大于250kJ/kg,比普通硅酸盐水泥降低约20%~25%,可以减小混凝土浇筑后峰值温度。在掺合料上,粉煤灰的效果最为明显,掺量以胶凝材料总量的25%~40%为宜,过高的掺量虽然可以降低温升,但是会延缓强度的发展,影响施工进度。粉煤灰的火山灰活性在养护温度不小于20℃的条件下可以充分发挥出来,二次水化反应消耗Ca(OH)₂,生成C-S-H凝胶,改善孔结构,释放出较少的热量,同时兼顾了温控和耐久性两个项目的目标。矿渣粉(S95级)掺量一般控制在20%~30%,与粉煤灰复合使用时,总掺量不超过50%,可以细化孔隙结构、提

高密实性。

(二) 骨料选择与用水量控制

粗骨料的品种和粒径对混凝土温控性能有直接影响。水利工程一般采用连续级配的天然卵石或者爆破花岗岩碎石,最大粒径根据结构特征取80mm或150mm,较大粒径可以减少单位体积胶凝材料的用量,从而降低水化热总量。单方混凝土胶凝材料用量减少10kg时,峰值温升约下降1℃。用水量的控制直接影响水胶比,在保证工作性要求(坍落度60~80mm)的基础上,掺加高效聚羧酸减水剂(减水率 $\geq 25\%$),可使单位用水量降低到130~145kg/m³,减少水泥用量的空间。

(三) 抗裂纤维掺加

聚丙烯纤维(PP纤维)以在混凝土内形成三维乱向分布的微细纤维网络的方式,对早期的塑性收缩裂缝以及温度微裂缝有明显的抑制作用。工程常用掺量为0.6~1.0kg/m³,纤维长度19mm,长径比约为650。试验结果表明,掺入该规格PP纤维后混凝土早期(24h内)塑性收缩裂缝面积减少60%以上,28d劈裂抗拉强度提高约8%~12%。钢纤维掺加量为25~40kg/m³时,用于应力集中的区域,即闸室底板角隅、廊道孔口周围等处,可以大大提高混凝土的韧性,延缓裂缝的发展。

三、施工过程温控措施

(一) 浇筑温度控制

浇筑温度属于温控管理的起始控制点,规范规定大体积混凝土入模温度不高于28℃,部分高坝工程要求不大于20℃。降低浇筑温度的主要手段就是对粗骨料进行预冷。常用的方法有储料仓顶部喷洒冷水法(水温约5℃,喷洒量为骨料质量的2%~3%),可使骨料温度降低3~5℃;液氮骨料冷却系统使用后,单次处理可将骨料温度降到4~8℃,降温更明显^[2]。拌合用水可以改用冰水或者加片冰代替部分拌合水,冰的融化潜热约为335kJ/kg,当拌合水量的加冰率在30%到50%之间时,可以使混凝土出机温度降低3~6℃。混凝土运输时应对罐车罐体采取隔热保温或者覆膜遮阳措施,并且严格按照运输时间要求进行,高温季节单次运输时间不能超过45min,减少途中升温。

(二) 分层浇筑与层厚控制

分层浇筑属于控制大体积混凝土温升的施工组织方式。浇筑层厚度一般为1.0~1.5m,相邻两层混凝土浇筑间隔时间不小于5~7d,使下层混凝土基本达到水化热和强度。层间歇期间下层混凝土表面要持续保湿养护,

防止由于失水造成干缩裂缝。对于坝块平面尺寸较大时,在设计中可以设置诱导缝或者分块浇筑缝,把整个浇筑体分成若干个独立的温控单元,每一个单元控制在25m×25m范围内,可以有效地降低约束应力集中效应。

(三) 通水冷却技术

预埋冷却水管通水降温是水利水电工程大体积混凝土温控的主要技术手段之一。冷却水管一般用外径25mm或32mm的高密度聚乙烯管(HDPE)或者薄壁钢管,水平间距0.5~1.5m、竖向层距1.0~1.5m,具体布置参数按温控计算结果来定。通水冷却分为初期冷却和中期冷却两个阶段,初期冷却在浇筑24h内启动,通水流量0.6~1.2m³/h,进水温度不小于当时混凝土温度与10℃之差(即进出水温差不超过6℃),防止因急速冷却造成局部温度梯度过大;中期冷却在混凝土温度开始回落后进行,目标是使芯部温度缓慢降至稳定温度场附近(坝体稳定温度一般为10~16℃,视坝址年平均气温而定)。通水时间根据温度监测数据随时调节,一般30~90d。冷却水温与混凝土温度的差值严格控制在10℃之内,冷却速率不能大于1℃/d,防止温度应力过大。

四、养护与表面保护

(一) 养护工艺的核心要求与控制标准

混凝土浇筑完成后,养护及表面保护的主要目的就是控制温度差,保持湿润,避免产生有害裂缝,保证强度的发展。工艺的第一个要求就是控制好混凝土内、外及表层和环境之间的温差。拆模时混凝土表面温度与环境温度的差值应小于20℃,寒冷季节施工更甚,以减慢表层散热速度,减小温度梯度,减少温度应力。另一项基本的控制标准是早期强度^[3]。混凝土抗压强度未达1.2MPa前,禁止在混凝土表面上行走、堆放材料、做振动作业等影响混凝土结构性能的工作。这些控制标准一起形成了养护工艺实施的基本框架。

(二) 主要养护方法的实施与材料选择

为了达到上述控制标准,根据环境条件的不同选择相应的养护措施。湿润养护是应用最广泛的养护方式,在混凝土终凝之后开始,用麻袋、草席等保水材料覆盖混凝土表面,并且不断地洒水,使混凝土一直处在湿润的状态。掺加粉煤灰等掺合料的混凝土养护时间不得少于14天,甚至可达28天。洒水不便或者节水要求高时,可以使用喷涂养护剂代替,所选养护剂的保水性(用水蒸气透过率表示)应满足要求,一般透气率不应大于0.5g/(m²·d),并保证喷涂均匀、不漏喷。在低温下要采

用保温养护，常用聚苯乙烯泡沫板（EPS）等材料覆盖结构，水平面可用草帘加防水布。

（三）低温条件下的保温措施与技术要点

寒冷地区或者冬季施工时，保温隔热处理属于阻止混凝土表层温降过快、防止冷击裂缝的重要专项技术。保温材料选择要考虑导热系数、耐久性、施工方便性这三个因素。容重约 20kg/m^3 ，导热系数约 $0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的聚苯乙烯泡沫板（EPS）应用很广，50mm厚板的保温效果相当于250mm静止空气层。对墙、墩等竖向构件，在模板外面加设EPS板，拆模后立即用岩棉毡等包裹保温，时间不少于7天。对楼板等水平面一般用覆盖双层草帘和防水彩条布的处理。实施时要控制温度，保证混凝土表面温度不低于 5°C ，夜间气温低于 0°C 时还要增加覆盖层数，所有保温层应搭接严密，不能形成“冷桥”。

五、智能温控监测与反馈管理

（一）分布式光纤测温系统

传统点式热电偶测温方式存在测点稀疏、空间代表性差的缺点，而分布式光纤测温（DTS）系统可以实现对整个光纤全线的连续测温，空间分辨率可达到 $0.5\sim 1.0\text{m}$ ，测温精度优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，单根光纤测温长度可达几千米，特别适合于大坝等线型分布的大体积混凝土结构。传感光纤可以同预埋冷却水管的敷设路径一同铺设，防止再开凿出混凝土；也可以在浇筑之前，单独布置在结构截面的关键部位，比如底板中心、侧面距离表层0.1米和0.3米的地方，从而掌握温度梯度的空间变化情况^[4]。DTS系统收集的温度数据，每30分钟就自动生成到温控管理平台上进行上报，当温度超过限值的时候，立刻发出警报提示值班人员及时调整通水流量或者加强保温。

（二）实时反馈调控机制

温控智能管理系统依靠实时监测数据为动力，依靠内部嵌入的有限元温度应力仿真模型，来对混凝土未来24到72小时内的温度发展走向做出预估。当预测温差接近控制上限，内外温差为 22°C 或者表面与大气温差为 18°C 的时候，系统就自动向冷却水泵控制柜发指令，把通水流量由原来的 $0.8\text{m}^3/\text{h}$ 提高到 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ；并且向现场养

护管理人员发送移动端推送，告知需要在限定的时间内对保温层进行增设工作。反馈调控闭环的反应时间只有15分钟，在反应速度上比人工巡检快了很多。通过工程实践可知，使用智能温控系统控制浇筑仓块，其温度裂缝发生率比采用传统人工管理方式低大约40%到60%，有较好的质量控制效果。

六、结论与展望

本文对水利水电工程混凝土温度裂缝的成因及控制技术体系进行了系统的整理。从研究结果来看，采用低热水泥和矿物掺合料相结合的方式进行配比优化、预冷骨料和通水冷却相结合的方式进行调节、分布式光纤测温及智能反馈系统相结合的方式进行干预，可以将混凝土内外温差控制在规范限值以内，裂缝发生率降低40%~60%。工程实践证明，温控要贯穿材料、施工、养护、监测全过程，单靠一种方法很难达到长久控制的目的，材料的选择和智能管理相结合才是提高抗裂性的一种方式。

随着数字孪生、物联网技术的不断发展，以多种感测数据支持的温度调节平台由原来的“被动响应型”变成现在的“主动预测型”。低碳胶凝材料（固废基掺合料）的研发应用、自适应保温材料性能的优化、AI驱动的动态温控决策模型的建立等，都会成为解决大体积混凝土温控、低碳、耐久三者协同难题的重要途径，给超高坝、地下厂房等复杂的水工结构裂缝控制提供更加精准的技术支持。

参考文献

- [1] 田浩, 王腾飞, 张琪. 水利工程大体积混凝土施工温度控制技术的现场应用与优化研究[J]. 水泥, 2026, (04): 96-99.
- [2] 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, (01): 96-98.
- [3] 宇文韦. 水利工程大体积混凝土施工温度裂缝控制技术优化分析[J]. 河北水利, 2025, (10): 46-47.
- [4] 李国强. 水利工程施工中控制混凝土裂缝技术分析[J]. 珠江水运, 2024, (14): 66-68.