犬木塘灌区预应力渡槽大体积混凝土温控防裂成套施工技术研究

杨成福
中国水利水电第四工程局有限公司　青海　西宁　810000

摘　要：针对犬木塘灌区预应力渡槽大体积混凝土易受气候、结构约束及施工因素影响产生裂缝的难题，本文系统剖析裂缝成因与温控机理，确定分级温控核心指标。通过原材料优化、全过程浇筑控温、内外协同保温及智能监测调控成套技术，结合有限元模拟与现场试验验证。结果表明，该技术可精准控制温差与降温速率，实现工程零裂缝质量目标，缩短施工工期、延长结构耐久性，可为同类水利渡槽工程施工提供参考。

关键词：犬木塘灌区；预应力渡槽；大体积混凝土；温控防裂；成套施工技术

引言：预应力渡槽作为灌区输水核心构筑物，大体积混凝土施工极易因水化热释放、环境温差及预应力约束产生裂缝，直接影响结构防渗性与服役寿命。犬木塘灌区渡槽施工跨越冬夏两季，气候条件复杂，温控防裂施工难度极大。传统施工工艺温控精度低、裂缝防控效果差，难以适配工程高标准建设要求。为此本文研发成套温控防裂施工技术，通过多维度管控手段，解决复杂工况下混凝土开裂难题，保障工程施工质量与结构安全。

1　犬木塘灌区预应力渡槽大体积混凝土裂缝成因及温控机理分析

1.1 工程结构与施工工况特征

（1）犬木塘灌区预应力渡槽槽身为薄壁大体积预应力构件，采用底板、侧墙、顶板一体化浇筑，断面尺寸大、一次性浇筑方量大，结构受预应力束张拉锚固约束，内应力分布复杂，对温度梯度尤为敏感。（2）本工程地处湘中丘陵区，属亚热带季风气候，春夏高温多雨、冬季低温昼夜温差大，极端天气频发；施工期需跨越夏、冬两季，环境温度变化剧烈，加剧了混凝土内外温差与表层气温温差控制难度[1]。（3）预应力张拉施工与温控存在协同影响，张拉前混凝土必须达到设计强度与弹性模量，而温控措施的有效性直接影响强度发展及内部微裂缝生成；若温控失当，预应力锚固区易产生应力集中，诱发局部开裂。

1.2 渡槽混凝土裂缝主要成因分类分析

（1）材料因素方面，水泥水化热过高、粉煤灰掺量不足、骨料级配不良均会增大绝热温升，削弱混凝土抗裂性能；原材料入机温度偏高则直接抬高出机口温度，增加入仓控温难度。（2）施工因素主要表现为高温季节浇筑入仓温度超标、仓面裸露时间过长、养护覆盖不及时或湿养护中断，导致表面水分蒸发过快产生干缩裂缝；模板拆除时机不当、分段拆模未配套保温措施，亦易引发骤冷裂缝。（3）环境与结构因素包括夏季高温暴晒、冬季寒潮突袭等极端天气造成温差骤变，以及预应力张拉对构件的强约束作用，二者耦合作用下温度应力重分布，易在锚固区、截面突变处萌生裂缝。

1.3 温控防裂核心控制指标确定

（1）混凝土入模温度全年分时段管控：6～9月高温期不超过25℃，其余时段不超过28℃，最低入仓温度不低于5℃，确保入仓温度可控；内外温差不超过20℃、表面与环境气温温差不超过15℃。（2）降温速率单日整体降温控制在1℃以内，内部最高温度按施工月份分四级限值（冬季41℃、春秋47℃、温暖季55℃、夏季60℃），平缓释放水化热应力。（3）基于渡槽结构重要性及预应力体系要求，裂缝控制容许指标确定为：表面无可见裂缝、内部无深层贯穿裂缝，超声波检测无异常反射，确保结构耐久性与防渗安全。

2　犬木塘灌区预应力渡槽大体积混凝土温控防裂成套施工技术

2.1 原材料优化与配合比温控适配技术

（1）低热胶凝材料选用中低热硅酸盐水泥，3d水化热不大于240kJ/kg、7d水化热不大于270kJ/kg，进场水泥温度严格控制在60℃以内，通过延长场内储存静置时间自然降温；粗骨料选用线膨胀系数小、粒径5～31.5mm连续级配碎石，含泥量 ≤ 1.0%、针片状含量 ≤ 8%；细骨料采用细度模数2.6～3.0的天然河砂，含泥量 ≤ 2.0%，从材料层面降低绝热温升与收缩变形。（2）采用粉煤灰等量替代20%～30%水泥，粉煤灰细度（45μm筛余）≤ 12%，需水量比 ≤ 95%，利用火山灰效应平缓水

化放热速率；外加剂选用缓凝型聚羧酸高效减水剂，减水率 ≥ 25%，延缓初凝至6 ~ 8h，分散水化放热过程，复配引气剂使含气量4% ~ 6%，改善抗裂性能，复配方案经相容性试验验证[2]。（3）低水化热配合比设计遵循“低水泥用量、低水胶比、适宜砂率”原则，水胶比0.38 ~ 0.42，砂率38% ~ 42%，通过优化骨料级配减少单位体积胶凝材料总量，设计绝热温升较基准配合比降低8 ~ 10℃。试配阶段模拟现场施工环境温度，测试不同龄期抗压强度、绝热温升、自收缩及轴拉强度，确保满足设计强度与各季节温控限值双重指标。

2.2 全过程浇筑温控施工工艺

（1）高温季节骨料料场搭设遮阳凉棚，堆高 ≥ 6m并采用地垅取料工艺取用内部低温层骨料，粗骨料顶部持续喷洒2 ~ 5℃冷水降温；水泥罐体涂刷白色反光隔热涂料；拌合用水采用冰水替代常温拌和水，使出机口温度降低5 ~ 8℃。罐车加装遮阳隔热棚，高温季从拌和到入仓温升不超过5℃，其余时段 ≤ 3℃。（2）采用分层分段薄层连续浇筑工艺，每层厚度30 ~ 50cm，上层在下层初凝前覆盖，层间间隔不大于初凝时间的2/3；振捣作业采用插入式振捣棒快插慢拔、逐点移动，振捣点间距 ≤ 1.5倍作用半径，单点振捣20 ~ 30s，确保密实均匀，减少局部水化热聚集。高温时段避开10:00 ~ 16:00正午高温，集中夜间及早晚低温开仓浇筑[3]。（3）预应力槽身锚固区、底板加厚段、预应力管道密集区等关键部位加密振捣点并延长振捣时间5 ~ 10s，防止局部架空或不密实形成热应力集中薄弱面；浇筑前对上述部位模板及预埋件洒水预冷，确保关键部位温度场与槽身主体保持一致。

2.3 内部控温与外部保温防裂技术

（1）6 ~ 9月高温浇筑段于槽身底板及侧墙预埋Φ48×3.5mm钢管或高导热铝质冷却水管，水平间距 ≤ 1.0m，距结构边缘 ≤ 0.3m；混凝土覆盖后立即通水，流速0.6 ~ 0.7m/s，进口水温与内部温差 ≤ 25℃，通水不少于5d，每24h调换进出水方向，整体降温速率 ≤ 1℃/d，平缓释放水化热应力。（2）夏季收面后覆盖1 ~ 2cm厚闭孔泡沫保温板延缓表层散热，外层叠铺土工布与塑料薄膜密封保湿，配置智能喷淋系统不间断喷雾洒水，养护水温与表面温差 < 15℃；冬季采用4cm厚挤塑聚苯板粘贴外表面，延长带模养护蓄热，环境气温低于5℃时仅薄膜保湿、停止洒水防冻。湿养护周期不少于14d，覆盖层搭接密封宽度 ≥ 20cm。（3）遇昼夜温差超过15℃或寒潮降温达8℃/d以上时，即时加厚覆盖层、增设防风保温篷布；极端高温（ ≥ 37℃）仓面启动高压雾化系统，雾粒20 ~ 50μm，可降低局部环境温度3 ~ 5℃；突降暴雨后迅速排除积水并重铺干燥保温层，避免温差冲击[4]。

2.4 智能化温度监测与动态调控技术

（1）每跨选取支座端、1/4跨、跨中3个测温断面，每个断面于底板中心及两侧侧墙中部各布设1支测温元件（精度±0.3℃），共9支/跨，牢固绑扎于受力主筋内侧并辅以绝缘支架固定，防止振捣移位；电缆沿顺筋敷设、每10m铅丝固定并预留伸缩弯，接头采用防水密封套管保护，线缆引至外侧观测平台；埋设前完成精度标定，埋设后立即读取初始读数建立原始档案。

（2）浇筑过程每2h检测出机温度、入仓温度与环境气温；浇筑后0 ~ 3d峰值期每2h、3 ~ 5d每4h、5d后每8h各测读一次，寒潮期间加密至1h/次。所有数据录入智能监测系统，自动生成温度-时间历程曲线，绘制各断面温度梯度分布图，实时计算内表温差、降温速率及温升峰值，实现超限自动报警。（3）建立“监测-预警-响应”动态调控机制：当内表温差接近18℃（预警值）、降温速率超过0.8℃/d时系统自动报警，即刻调整通水流量、覆盖层或养护水温；内部最高温度接近季节限值时启动加大通水、喷雾降温等应急措施。每次预警处置形成闭合记录，经设计、监理确认归档，确保温控措施动态优化，将裂缝风险降至最低。

3 工程应用效果分析与技术优化

3.1 数值模拟分析与温控效果预判

（1）基于ANSYS有限元软件建立渡槽槽身温度场与应力场耦合分析模型，按实际断面尺寸、配筋及预应力孔道建立三维实体单元，施加环境气温、入仓温度、水化热放热速率及边界换热系数等边界条件，模拟混凝土浇筑后0 ~ 28d温度场演化过程与应力分布规律。（2）分别模拟夏季高温（日平均气温35℃）、冬季低温（日平均气温5℃）及春秋过渡季三种典型工况下的温度场与应力场；对比分析设置通水冷却与未设置通水冷却、覆盖保温与未覆盖保温等不同条件下的温控防裂效果，确定各季节最不利工况下的峰值温度与最大拉应力分布位置。（3）模拟结果显示：高温季节采取骨料预冷+冰水拌合+通水冷却组合措施后，内部最高温度由预测的68℃降至57℃，低于60℃限值；最大主拉应力由2.8MPa降至1.6MPa，小于同龄期混凝土抗拉强度，预判各施工季节温控指标均满足规范要求，为现场施工方案优化提供依据[5]。

3.2 现场施工应用与检测结果分析

（1）现场施工严格按“原材料预冷→拌合控温→运输遮阳→薄层浇筑→通水冷却→覆盖养护→温控拆

模”全流程执行，每道工序设专职温控员旁站记录，建立“一槽一档”质量追溯台账，实现全过程闭环质量管控。（2）全线已完工渡槽实测测温数据统计分析表明：高温季节浇筑槽身内部最高温度57.2℃，内外温差13～17℃，表层与气温温差7～10℃，降温速率0.5～0.8℃/d，全部满足设代文件限值要求；冬季施工槽身内部最高温度35.6℃，入仓温度13～18℃，无低于5℃情况。（3）已完工渡槽经外观全面检查、超声波无损检测及蓄水试验，结构表面平整光洁，未发现任何可见裂缝、深层贯通裂缝或渗水点，超声波检测无异常反射信号，预应力张拉锚固效果良好，结构成型质量验收一次性通过，蓄水后槽身无渗漏，结构安全运行状态优良。

3.3 传统工艺与成套技术应用效果对比

（1）温控精度与裂缝控制：传统工艺仅采用洒水养护和简易覆盖，同区域类似渡槽工程裂缝发生率约15%～20%，且温差超标频发；本成套技术将内表温差控制精度提升至±3℃以内，实现全线零温度裂缝。（2）施工效率与成本：成套技术增加的骨料预冷、通水冷却等措施单跨增加成本约2.5万元，但避免了裂缝修补工序及工期延误，单跨综合施工周期缩短5～7d，整体工程提前15d完工，返工成本节约显著。（3）长期耐久性：无裂缝结构有效阻断有害介质侵蚀通道，预应力体系无锈蚀风险，结构设计使用寿命期内安全裕度充足；定量评估表明，本工程渡槽耐久性年限较传统施工条件下延长约15～20年。

3.4 施工技术问题复盘与优化改进

（1）现场复盘发现：部分跨段冷却水管出水温度监测不及时，个别时段进出水温差超过15℃，影响均匀降温效果；高温时段仓面喷雾系统偶有喷嘴堵塞，雾化覆盖率不足；低温季侧墙外保温板拼缝处密封不严，存在局部冷桥风险。（2）针对上述问题，优化改进方案如下：冷却水系统增设进出水端在线温度监测仪并联动通水流量调节阀；喷雾系统增设过滤器及反冲洗装置，喷头采用防堵塞型；保温板拼缝处采用专用密封胶填缝并外覆整张防风篷布，搭接宽度不小于50cm；增加关键部位预埋应变计，实现应力实时监测辅助温控决策。（3）建议同类水利渡槽工程推广应用本成套技术时，施工前开展基于当地气象条件的精细化温控模拟，合理确定各季节入仓温度与通水参数；施工中加强温控人员专职配置与技能培训，注重极端天气应急物资储备；注重过程数据积累与成果总结，推动大体积渡槽温控施工技术标准迭代升级。

结束语

本文形成的大体积混凝土温控防裂成套施工技术，有效解决了犬木塘灌区预应力渡槽施工温差超标、裂缝易发等核心问题，经工程应用验证，温控指标全部达标，实现零裂缝施工成效，兼具质量、工期与经济效益。针对现场施工暴露的细节问题完成技术优化，完善了水利渡槽温控施工体系。该成套技术适用性与可行性较强，可为南方丘陵区同类渡槽工程温控施工提供标准化技术借鉴。

参考文献

[1]曹肇金,邓建祥,谢欣.大型渡槽施工期冷却水管布置方案及温控优化研究[J].中国农村水利水电,2023,19(07):167-172.

[2]白新理,王单飞,吴泽玉.保温措施对大型预应力渡槽温度应力及抗裂性能的影响[J].水利水电技术,2022,53(08):112-118.

[3]刘杏红,段寅,常晓林.水工大体积混凝土多场耦合温控防裂施工技术研究[J].水力发电学报,2023,42(05):98-106.

[4]张永存,李青宁.薄壁大体积混凝土渡槽施工期温度裂缝演化规律研究[J].混凝土与水泥制品,2024,26(03):76-80.

[5]蒋俊峰.大型薄壁预应力渡槽大体积混凝土温控施工工艺优化[J].四川水利,2024,45(06):89-93.