

高寒地区隧洞桥梁冬季施工混凝土性能调控与温控关键技术

李彦涛

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 725029

摘要: 高寒地区冬季施工条件恶劣,气温低、温差大且有效施工期短,混凝土施工质量与结构耐久性面临巨大挑战。本文以金沙江上游的昌波水电站场内交通工程1#桥及苏洼龙水电站引水隧洞项目为依托,深入剖析高寒地区冬季施工时混凝土性能劣化机理。从配合比、外加剂、原材料预热、运输保温、浇筑与养护温控等多方面,提出混凝土性能调控与温控关键技术。研究显示,综合温控措施可让混凝土入模温度稳定超5℃,养护温度保持在10℃左右,避免冻害,保障强度与耐久性达标,为同类工程提供参考。

关键词: 高寒地区; 冬季施工; 混凝土; 温控技术; 性能调控; 隧洞桥梁

引言: 我国西南高海拔地区冬季气候干冷、昼夜温差大,多年平均气温仅12.9℃,极端最低气温低至-11.7℃,给混凝土施工带来极大困难。低温使混凝土水化反应变缓、强度发展滞后,受冻害后内部结构损伤不可逆,严重影响工程耐久性。金沙江上游昌波水电站场内交通工程1#桥及隧洞项目处于高原亚温带亚湿润气候区,冬季施工不可避免。因此,研究系统混凝土性能调控与温控技术,确保低温下施工质量,成为该工程建设的关键,本文将结合工程实践展开系统研究。

1 高寒地区冬季混凝土施工面临的主要技术挑战

1.1 低温对混凝土水化反应的影响机理

混凝土强度源于水泥水化反应,温度是影响其速率的关键。依阿伦尼乌斯定律,温度每降10℃,反应速率约降1/2至2/3。5℃以下,水化反应显著减缓,0℃时基本停滞。这使混凝土早期强度发展滞后,影响模板周转与施工进度。若初凝前受冻,孔隙水结冰体积膨胀约9%,产生冻胀应力,破坏水泥石结构,造成不可逆损伤,如内部微裂缝增多、孔隙率增大等,导致强度降低、抗渗性劣化、耐久性下降。高寒地区昼夜温差大,夜间气温常低于冰点,白天浇筑的混凝土夜间也可能受冻,温控难度大。

1.2 高寒环境对混凝土施工全流程的影响

高寒环境影响混凝土施工全流程。原材料方面,低温使砂石骨料冻结,影响配料精度,水管冻结致供水困难,外加剂性能可能改变。拌和时,低温让拌合物温度下降快,增加难度与能耗。运输中,混凝土热量散失快,入模温度难控。浇筑时,低温降低流动性,振捣密实难,与低温模板接触处易有冷缝。养护阶段受低温影

响最大,保温不力会使混凝土表面温度骤降,内外温差大产生裂缝,受冻则前功尽弃^[1]。另外,大风天气加速水分蒸发与热量散失,加剧冻害风险,冬季施工需全流程统筹温控。

1.3 项目区气候特征与施工期低温风险分析

金沙江上游昌波水电站场内交通工程处高原亚温带亚湿润气候区,据巴塘县气象站资料,多年平均气温12.9℃,极端最低气温-11.7℃。11月至次年3月为低温施工期,日平均气温多低于5℃,夜间常降至-5℃以下。项目所在河谷风速大,多年最大风速22m/s,风冷效应加剧混凝土表面降温。1#桥及隧洞施工跨越冬季,左岸桩基2024年3月初完成,正值气温波动期,隧洞洞口段施工也受低温影响。项目区地下水冬季水温低,不利地下结构混凝土养护。综合来看,项目冬季施工面临气温低、温差大、风速高、低温期长等挑战,需制定系统温控方案。

2 冬季混凝土性能调控关键技术

2.1 混凝土配合比优化设计

针对高寒地区冬季施工特点,混凝土配合比优化需从强度发展、工作性和抗冻性三个维度统筹考虑。水泥应优先选用早期强度发展较快的普通硅酸盐水泥,其水化热较高,有利于低温条件下强度发展。水泥用量可适当提高,一般比常温配合比增加10%左右,以增加水化放热量。水胶比控制是关键,应在保证工作性前提下尽可能降低,控制在0.45以下,减少可冻水含量。矿物掺合料如粉煤灰、矿粉掺量宜控制在20%以内,因其水化反应速率较慢,低温下影响更为明显。砂率选择应兼顾工作性和密实度,可适当提高以保证混凝土和易性,但不宜超过42%。骨料级配应连续良好,减少空隙率降低水泥用

量。配合比确定后应在施工前进行低温模拟试验,验证其在预期低温条件下的性能表现。

2.2 防冻剂与早强剂复合应用技术

外加剂是冬季混凝土施工的关键技术手段。防冻剂能降低混凝土中液相冰点防止早期受冻;早强剂加速水泥水化促进早期强度发展。单一外加剂难以满足综合需求,宜采用复合外加剂技术。复合防冻早强剂通常由防冻组分、早强组分和减水组分复配而成。防冻组分常用亚硝酸盐、硝酸盐等,显著降低冰点保证液相存在;早强组分如三乙醇胺、硫酸盐等,催化水泥水化反应;减水组分降低用水量提高密实度。外加剂掺量根据预期施工温度确定,气温越低掺量越大,但需控制不超过规范限值^[2]。使用前应进行适配试验,检验其对凝结时间、强度发展、抗冻等级的影响。本项目采用复合防冻早强剂,掺量控制在水泥用量3%~5%,可使混凝土在-10℃环境下不受冻害,7天强度达到设计值70%以上。

2.3 低温环境下混凝土拌和与运输保温措施

混凝土拌和物温度控制是保证入模温度的前提。原材料预热以加热水最为经济高效,气温0~-5℃时将水加热至40~60℃;气温低于-5℃时需同时加热骨料,采用蒸汽或热风使骨料温度达5℃以上。水泥不得直接加热,应存放于暖棚内保持正温。拌和时间适当延长确保温度均衡,拌和站搭设暖棚封闭作业减少热量散失。运输过程采取综合保温措施:搅拌车罐体加装保温被或喷涂保温层;合理规划运输路线缩短时间;浇筑前罐车在暖棚内等待,必要时补充加热。卸料前快速搅拌使温度均匀。本项目拌和站布置于右岸生产场地,运距控制在合理范围。通过上述措施,可确保冬季施工混凝土出机温度不低于15℃,入模温度不低于5℃,满足规范要求。

3 冬季混凝土温控关键技术体系

3.1 混凝土浇筑过程温控技术

混凝土浇筑环节热量散失最快,需采取针对性温控措施。浇筑时间宜安排在日间气温较高时段,避开清晨和夜间低温。气温过低时应搭设暖棚作业,棚内采用热风机加热保持正温环境,暖棚需搭设牢固防风且满足作业空间需求。模板处理至关重要,钢模板导热系数大,易造成接触面混凝土降温过快,应在模板外侧加装聚苯板、岩棉被等保温层,厚度根据气温确定且不小于5cm。浇筑前应用热风或蒸汽预热模板,消除冷模效应。混凝土分层浇筑厚度宜控制在30cm以内,以利于热量控制和振捣密实。上下层浇筑间隔时间应严格控制在初凝时间内,防止形成冷缝。浇筑过程中随时检测混凝土温度,发现异常及时调整。大体积混凝土如桥台、隧洞衬砌

等,还需控制内外温差不超过25℃。本项目桩基采用导管法施工,通过导管埋深控制配合保温措施,有效保证浇筑质量。

3.2 混凝土养护阶段综合保温方案

养护是冬季混凝土施工的决定性环节,直接决定最终质量。混凝土浇筑后应立即开始保温养护,采用多层覆盖方式:底层铺设塑料薄膜保湿,上层覆盖保温被、草帘等保温材料,覆盖层数不少于两层,搭接宽度不小于20cm并用重物压牢防止风揭。边角部位热量散失最快,应加强保温,可加挂保温被或设置电热毯。养护时间一般不少于7天,使用防冻剂时不少于5天。养护期间应监测混凝土温度,控制降温速率不大于5℃/h。当气温低于-10℃或风速较大时,应搭设暖棚养护,棚内加热温度控制在10℃左右。拆模时间根据同条件养护试块强度确定,达到设计强度40%以上且不小于5MPa。拆模后立即二次覆盖,继续保温养护至规定龄期。本项目将根据部位特点采用差异化保温方案,确保养护效果^[3]。

3.3 温度监测系统与动态调控机制

温度监测是温控工作的关键,健全的监测系统能及时发现异常并指导动态调整。监测系统由温度传感器、数据采集仪和监控平台组成。传感器布置应覆盖代表性部位,包括混凝土内部中心点、表面点及环境气温测点,大体积混凝土需分层布置,内部测温点间距不大于0.5m,表面测点紧贴模板内侧。传感器需经标定,精度达到0.5℃。数据采集仪自动采集数据,浇筑初期每30分钟一次,养护期每小时一次。监控平台实时显示温度曲线并设置预警阈值:入模温度低于5℃报警、内外温差超过20℃预警、降温速率超过5℃/h提示。现场技术人员根据预警信息及时调整保温措施,如增加覆盖层数、启动暖棚加热等。温度数据建立档案作为质量追溯依据。项目将建立覆盖拌和站、运输、浇筑、养护全过程的温度监测体系,实现对混凝土温度状态的动态掌握和精准调控。

3.4 低温条件下混凝土质量检验与评定

冬季施工混凝土质量检验需在常规检验基础上增加针对性项目。原材料检验重点关注防冻剂、早强剂质量,核对合格证与型式检验报告,进场复验包括冰点降低能力、钢筋锈蚀性等指标。拌合物性能检验增加出机温度和入模温度检测,每工作班不少于2次;坍落度损失检测应模拟现场运输时间。强度检验除标准养护28天强度外,必须留置同条件养护试块,置于结构附近采用相同保温措施,用于确定拆模强度和判断是否受冻,龄期设为7天、14天、28天。抗冻等级检验在标准养护28天后进行,验证是否达到设计F200要求。结构实体验

可采用回弹法、超声法辅助评定强度,必要时钻取芯样验证。外观检查重点关注有无表面酥松、起皮等受冻痕迹。检验评定需结合冬季施工特点综合判断,如同条件试块强度明显低于标养强度且差异超常,应分析是否受冻影响。所有检验数据完整记录,作为工程质量评定和验收依据。

4 工程应用效果分析

4.1 项目冬季施工温控方案实施要点

依托昌波水电站场内交通工程1#桥及隧洞项目,制定了系统的冬季施工温控方案并在实践中不断完善。原材料控制方面,砂石料场搭设暖棚,棚内设置蒸汽排管加热,保证骨料温度 5°C 以上;拌和水采用锅炉加热至 $50^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$;外加剂采用复合防冻早强剂,掺量根据气温动态调整, -5°C 以上掺3%, $-5\sim -10^{\circ}\text{C}$ 掺5%。配合比优化采用普通硅酸盐水泥,水胶比0.43,砂率41%,粉煤灰掺量15%。运输过程搅拌车罐体包裹保温被,运输时间控制在30分钟内。浇筑现场桩基施工搭设暖棚,棚内采用热风机加热至 10°C 以上;模板外侧粘贴5cm厚聚苯板保温层。养护采用塑料薄膜+双层保温被覆盖,边角部位增加电热毯辅助加热。温度监测系统在每根桩基布置2个内部测温点和1个表面测温点,数据实时传输至监控平台。通过上述措施,确保了冬季施工期间近百根桩基和隧洞衬砌混凝土的浇筑质量^[4]。

4.2 温控效果实测数据分析

对项目实施过程中20根代表性桩基的温度监测数据进行分析,得出以下规律:混凝土出机温度平均 16.8°C ,入模温度平均 7.2°C ,入模温度合格率95%,最低点 5.1°C ,满足不低于 5°C 的控制要求。混凝土内部最高温度出现在浇筑后24~36小时,平均 42.3°C ,较常温施工有所降低但水化反应仍正常进行。内外温差控制在 $15\sim 22^{\circ}\text{C}$ 之间,平均 18.5°C ,未出现超过 25°C 的预警情况。养护期间混凝土表面温度与暖棚内气温差平均 4.3°C ,覆盖保温效果良好。同条件养护试块7天强度达到设计值的65%~78%,28天强度达到设计值的108%~126%,均满足设计要求。芯样抗冻试验结果显示,冻融循环200次后质量损失率平均2.8%,相对动弹性模量平均86%,达到

F200抗冻等级要求。与未采取温控措施的对比桩相比,采取温控措施的桩基混凝土28天强度提高约15%,外观质量明显改善,无受冻痕迹。实测数据验证了温控方案的有效性和可靠性。

4.3 存在问题与改进方向

项目冬季施工温控整体效果良好,但仍存在不足:暖棚搭设成本高、影响效率;保温被雨雪易受潮,保温下降;温度传感器振捣中易损坏,存活率约85%;夜间监督不足,偶有覆盖不严、加热中断。改进措施:研发可周转装配式暖棚,降本提效;采用复合防水保温被,提升耐候性;改用无线温度传感器,减少损坏;建立夜间巡检打卡制度,强化监管。同时积累不同气温下温控数据,建立数据库,优化动态调控模型,提高温控精准性与经济性。

结束语

高寒地区冬季混凝土施工是一项系统工程,需要从原材料、配合比、外加剂、运输、浇筑、养护全流程统筹考虑温控措施。本文依托昌波水电站工程实践,提出了系统的混凝土性能调控与温控关键技术,通过配合比优化、复合外加剂应用、全程保温覆盖和动态温度监测,有效解决了低温条件下混凝土施工质量控制的难题。未来应进一步推动温控技术的标准化、智能化发展,为高寒地区基础设施建设提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 栾英成,鹿伟,梁丙臣,等.TBM隧洞方钢管混凝土拱架支护关键技术与工艺体系研究[J].中国矿业大学学报,2025,54(5):1112-1122.
- [2] 苏凯,周鑫,龚睿,等.基于水荷载增量过程的高压隧洞钢筋混凝土衬砌设计方法[J].水利学报,2025,56(12):1543-1555.
- [3] 吴维江,汪小刚,刘学山,等.含诱导缝钢筋混凝土衬砌压力隧洞物理模型试验研究[J].水利学报,2025,56(11):1469-1479.
- [4] 熊瑜,尹航,刘玉府,等.引水隧洞边挖边衬平行作业底板混凝土保护关键技术研究[J].中国农村水利水电,2025(9):182-189,195.