

高海拔地区水电站工程混凝土防冻害施工技术研究

梁先吉

中国水利水电建设工程咨询中南有限公司, 湖南长沙, 410007;

摘要: 为解决高海拔地区水电站工程混凝土易受低温、冻融循环等因素影响产生冻害的问题, 以高海拔特殊施工环境为背景, 对混凝土防冻害施工核心影响因素及对应技术措施开展研究。分析高海拔环境、材料性能、施工工艺三大关键影响因素, 提出混凝土配合比优化设计、施工全过程温度控制、特殊部位防冻强化三类施工技术, 搭配全流程质量管控、人员设备保障及冻害应急处置等质量保障手段。研究成果可有效提升高海拔混凝土抗冻性能, 减少冻害隐患, 为同类工程施工提供技术参考, 保障水电站结构安全与耐久性。

关键词: 高海拔水电站; 混凝土冻害; 智能温控; 施工技术; 结构耐久性

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.043

引言

高海拔地区是我国清洁能源开发的核心区域, 叶巴滩、孟底沟等重大电站的建设推动水电工程向高寒复杂环境延伸。此类区域低温剧烈、冻融频繁且辐射强烈, 混凝土结构易因早期强度不足、温度应力累积出现冻蚀、裂缝等病害, 制约工程安全与耐久性。当前智慧建造与绿色施工理念深化, 智能温控、新型抗冻材料等技术为防冻害提供新路径, 但传统工艺与高海拔特殊工况的适配难题仍未完全破解。基于此, 立足环境特性、材料性能与施工规范三大核心维度, 探究适配高海拔场景的防冻害技术与质量保障体系, 为同类工程全年连续施工、提质增效提供支撑, 助力能源绿色转型与重大工程建设安全。

1 高海拔地区混凝土防冻害施工核心影响因素

1.1 高海拔特殊环境因素影响

高海拔低温、冻融循环及强辐射等环境因素形成协同作用, 持续加剧混凝土冻害风险。高海拔区域常年气温偏低, 尤其夜间温差剧烈, 会显著延长混凝土凝结时间, 导致水化反应速率放缓, 早期强度形成效率大幅下降。此时混凝土结构尚未形成足够抗冻能力, 极易因温度应力产生微裂缝, 为后续冻害提供侵入通道。冻融循环是破坏混凝土内部结构的核心诱因, 高海拔地区昼夜温差与季节交替形成的频繁冻融, 使混凝土内部孔隙水反复结冰膨胀、融化收缩, 产生周期性压力冲击孔隙壁, 逐步扩大孔隙尺寸并形成连通裂缝, 最终导致结构密实度降低、强度衰减。强紫外线辐射则聚焦于混凝土表层, 加速表层砂浆水化产物分解, 破坏水泥石与骨料的粘结界面, 使表层混凝土出现粉化、剥落现象。

1.2 混凝土材料自身性能影响

混凝土原材料的挑选类型和配比是不是合适, 直接决定了它抵抗冻害能力的基本门槛, 材料本身性能上的不足会从一开始就埋下冻害的隐患, 水泥作为起胶结作用的核心部分, 它的品种和强度等级直接关系到水化过程放出热量的效率以及抵抗冻害的基体强度, 低热类型的水泥虽然能够减少因为水化热产生裂缝的危险, 不过在低海拔低温条件里要是用量不合适, 就会造成水化放热不够, 更进一步拖慢强度增长的速度; 早强类型的水泥可以加速早期强度的形成, 但需要把握好用量, 防止由于水化热集中带来内部应力, 骨料构成了混凝土的骨架核心, 级配是不是连续直接影响结构密实的程度, 不连续的级配容易形成空腔, 让孔隙比例上升, 给冻胀现象准备了更多地方。骨料里面泥土的含量需要严格按照规范要求来把控, 过多的泥土物质会包裹在骨料表面, 妨碍水泥和骨料之间的粘结, 削弱界面处的强度, 在冻融循环条件下容易在界面那里产生剥落损伤^[1]。外加剂跟其他材料的匹配程度直接决定了防冻、引入气泡以及提早达到强度的效果, 挑选类型不对或者掺入量有偏差会引起不好的作用, 引气剂需要能够带进均匀细小的封闭孔隙, 假如气泡太大或者分布不均匀, 反倒会让混凝土强度下降; 防冻剂必须跟水泥品种相适配, 避免跟别的成分出现化学反应, 不然就会失去防冻的功能, 甚至对混凝土的耐久性造成影响。

1.3 施工工艺规范性影响

施工里每个环节的操作是不是规范, 会直接影响到混凝土内部结构的完整程度, 不正确的操作带出的内部缺陷, 会明显加大冻害的隐患, 搅拌跟浇筑时温度的控制, 是防止早期受冻的关键点。在高海拔低温环境里,

要是原材料没有提前预热或者搅拌过程热量散发太快,会导致混凝土入模温度比规范要求低,直接带来早期受冻损伤,这种损伤带有隐蔽性,一开始很难发现,却会永久性地削弱混凝土结构强度和抗冻能力。振捣作业的密实度控制同样很重要,振捣不够充分会让混凝土内部留下蜂窝、麻面以及孔隙,这些缺陷变成冻胀压力的集中作用位置,冻融循环过程中会优先扩展形成裂缝;过度振捣则会引起骨料分层离析,破坏混凝土骨架结构,使得表层砂浆富集、内部强度不均匀,降低整体抗冻能力,养护环节的及时性和保温措施有没有效果,直接关系到混凝土强度发展和抗冻性能的形成,高海拔地区低温干燥,要是养护不及时,混凝土表面水分快速蒸发,不仅干扰水化反应持续进行,还会形成干缩裂缝;保温措施不够则会造成混凝土内部温度快速下降,强度发展停止,达不到抵御冻害的临界强度,最终在后面使用中因为冻融作用出现结构损伤。

2 高海拔混凝土防冻害施工技术

2.1 混凝土配合比优化设计

通过科学优化混凝土配合比,可同步提升结构密实度、早强性及抗冻融能力,构建抵御高海拔冻害的材料基础。水泥选型需结合高海拔环境特性与工程需求,优先选用早强型或低热早强复合型水泥,在保证水化放热效率的同时,避免水化热集中引发的内部裂缝。胶凝材料用量需精准控制,过量使用会增加水化热与收缩应力,过少则无法保证结构密实度,需根据骨料级配、强度等级及抗冻要求,确定最优用量区间。骨料级配优化以降低空隙率、提升骨架支撑性能为核心,采用连续级配骨料并合理调整各粒径比例,使粗骨料间隙被细骨料充分填充,减少混凝土内部原生孔隙^[2]。同时严格控制骨料含泥量与针片状含量,避免泥质杂质影响界面粘结,确保骨料与水泥石形成稳固整体。外加剂参加需遵循适配性原则,引气剂优先选用松香类或烷基苯磺酸盐类产品,精准控制掺量以引入体积分数4%-6%的封闭微小气泡,这些气泡可缓冲冻胀压力,阻断孔隙水结冰膨胀对结构的破坏。

2.2 施工全过程温度控制技术

在施工的整个流程里做好温度控制可以避免混凝土遭受冻结,为强度逐步提升创造环境条件,构建起“预热-浇筑-养护”这样一条完整的温度管理链条,对原材料的预热与保温主要针对水泥、骨料还有拌合水,水泥运到现场后存放在保温库房里,防止因低温受潮结成硬块;骨料借助蒸汽预热方法,把温度控制在5℃到10℃

之间,避免低温骨料拉低拌合料整体温度^[3];拌合水借助加热设备提升温度到40℃至60℃,严格把握升温幅度,防止水温太高引起水泥假凝,搅拌期间持续监测拌合料温度,保证入模温度不低于5℃,既满足规范要求,又给水化反应带来合适环境,浇筑操作采取分层分段做法,每层浇筑厚度控制在30厘米到50厘米,缩短每层浇筑之间的间隔时间,减少热量流失,浇筑过程中及时盖上保温被,不让混凝土表面直接接触低温环境,防止冷缝出现。养护阶段依据环境温度选择合适方式,气温高于-5℃时采用蓄热养护,铺上保温被和塑料薄膜,依靠混凝土自身水化热保持温度;气温低于-5℃时采用加热养护,借助蒸汽或电加热设备控制养护环境温度,确保混凝土在临界强度形成期(一般为7天)内温度不低于0℃。

2.3 特殊部位防冻害强化措施

针对水电站不同关键部位的结构特点与受力条件,采取专门性加强手段,准确对抗冻害影响。大坝迎水面、廊道等长时间接触水体或处在潮湿条件里的位置,冻害危险明显高于别的地方,需要采用抗冻级别不低于F300的混凝土,同时在表面涂抹渗透型结晶防水涂料或聚氨酯防水涂层,这类涂层能够渗入混凝土表面孔隙,形成封闭防水层,阻挡水分进入,从根源上减少冻胀发生的条件,同时提高表面抗风化性能,延长构造使用时间。钢筋密集区域比如梁柱节点、预应力锚具附近,振捣操作难度较大,容易出现密实程度不够的情况,冻融条件下容易产生局部冻蚀。施工过程中需要改进振捣方法,采用插入式振捣器与附着式振捣器一起使用,保证振捣能量传递到钢筋间隙,消除内部空隙,同时可以适当调整混凝土坍落度,增加流动性,确保钢筋周围混凝土填充饱满,避免局部构造薄弱带来冻害问题。施工缝、伸缩缝属于混凝土构造的薄弱位置,缝隙地方容易积水结冰,产生冻胀压力造成构造开裂。需要采用柔性密封材料填充,优先选用遇水膨胀止水条与聚氨酯密封胶复合密封方式,止水条嵌入预留槽内,密封胶填充表面缝隙,形成双重密封结构。

3 高海拔混凝土防冻害施工质量保障技术

3.1 施工质量管控流程构建

建立全流程质量管控机制,从原材料、施工过程到成品检测形成闭环管理,从源头规避防冻害施工隐患。原材料进场检验聚焦抗冻相关核心指标,水泥需核查强度等级、水化热、安定性等参数,确保符合高海拔施工要求;骨料需检测级配、含泥量、冻融损失率,不合格

骨料严禁进场；外加剂需进行适配性试验，验证防冻、引气、早强效果，同时核查有害物质含量，避免影响混凝土性能。检验过程实行双人复核制度，确保检测数据真实可靠，从材料源头筑牢抗冻质量防线。施工过程管控以关键参数实时监测为核心，温度监测覆盖原材料预热、拌合料入模、浇筑及养护全阶段，采用智能温度传感器实时采集数据，异常时自动报警并触发调整措施^[4]。振捣作业管控明确振捣时间、频率及插入深度，安排专人全程监督，避免振捣不充分或过度振捣。养护措施管控重点核查保温材料铺设完整性、加热装置运行状态，确保养护环境符合温度要求。

3.2 施工人员与设备保障措施

加强施工人员专业能力跟设备适配性，给防冻害技术落地给出人力与设备支持，保证施工质量稳定可控，人员保障以专项培训作为核心，针对高海拔混凝土防冻害施工特点，开展针对性训练，内容涉及配合比优化要点、温控技术操作、特殊部位施工规范、质量隐患识别等，培训结束后进行实际操作考核，考核通过才能上岗干活，避免由于操作不规范带来质量问题，这有助于建立技术交底制度，施工前由技术负责人向作业班组详细交底，明确各环节技术要求与质量标准，保证施工人员准确掌握操作要点，设备保障集中在耐寒性与稳定性上，施工设备选用适合高海拔低温环境的型号，搅拌设备、振捣器、加热装置等都需要具备耐寒性能，避免低温环境下故障停机^[5]。监测仪器选用精度高、抗干扰能力强的智能设备，定期校准保证数据准确，为施工管控给出可靠依据，建立设备定期检修维护机制，每天施工前检查设备运行状态，重点排查加热装置密封性、振捣器动力性能、温控设备灵敏度；定期进行全面检修与保养，更换老化部件，清理设备故障隐患，保证设备长期稳定运行。

3.3 冻害应急处置机制建立

建立快速应急响应系统，针对极端低温天气和突然发生的冻融灾害来制定处理方案，最大限度减少冻害对工程质量带来的影响。应急预案需要结合高海拔地区的气候特征，明确极端低温（低于-15℃）、突发冻融、表层冻蚀等不同灾害情景的处理步骤、责任划分及技术手段，组建应急处置团队，明确组长、技术负责人、作业人员的任务，确保灾害出现时能够快速反应、协作配

合。应急物资储备重点放在保温、加热以及抢修需求上，提前准备足够数量的保温被、防寒毡、蒸汽发生器、便携式加热装置、修补砂浆、止水材料等物资，分类存放并定期查验，保证物资完好能够使用，同时设立物资应急调配机制，与周边供应商建立联系，保障突发情况下物资得到及时补充，冻害发生之后，先组织技术人员评估损伤程度，确定损伤类型、范围及影响深度，再有针对性地采取处理办法，表层轻微冻蚀使用修补砂浆涂抹修复，确保表层密实；内部裂缝借助压力灌浆方式填充，阻止水分进入；冻胀引发的结构变形需要制定加固方案，恢复结构承载能力，处理结束之后，加强养护与监测，跟踪结构性能变化，避免再次发生冻害。

4 结语

高海拔地区水电站混凝土防冻害施工是系统性工程，需兼顾环境特殊性、材料适配性与施工规范性。本文梳理的核心影响因素与技术措施，贴合高海拔低温、冻融频繁的实际工况，可有效弥补传统施工技术的不足，为工程抗冻质量提供支撑。各类技术手段相互协同，从材料优化到过程管控，再到应急处置，形成完整的防冻害技术体系，既保障混凝土结构安全，也延长水电站工程使用寿命。后续可结合智能监测技术深化研究，进一步优化技术参数，适配不同海拔、气候条件的施工需求。期待相关技术在更多工程中推广应用，推动高海拔水电施工技术朝着更高效、耐久的方向发展。

参考文献

- [1] 冯兴高, 张国栋, 廖永杰. 水电工程综合性混凝土配合比设计方法优化研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(23): 126-132+166.
- [2] 杨德生, 赵素云. 高性能混凝土在水利工程施工中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(20): 117-119.
- [3] 李芝军. 水电站工程中三维勘测设计技术应用研究[J]. 低碳世界, 2024, 14(10): 40-42.
- [4] 熊先亮, 丁凯, 徐子强. 隐轨翻模在金川水电站溢洪道混凝土浇筑中的应用[J]. 人民黄河, 2024, 46(S1): 169-170.
- [5] 李金龙, 朱文哲, 罗浩. 某水电站过水流通处理方法及应用效果检验[J]. 云南水力发电, 2024, 40(05): 171-173.