

混凝土冬季施工技术及其防冻措施研究

黑志文 邹淑清

吴忠市红寺堡区永进砼业有限公司 宁夏 吴忠 751900

摘要: 冬季低温环境对混凝土施工及质量产生显著影响,易导致混凝土冻害、强度损失及耐久性下降。本文系统分析了冬季混凝土施工的技术难点,从原材料选择、配合比优化、加热保温工艺、外加剂应用及养护管理等方面提出综合防冻措施。结合工程案例,深入探讨不同防冻技术的适用条件与实施效果,验证采用蓄热法与外加剂复合技术,可使混凝土在-15℃环境下仍能达到设计强度要求。同时,提出冬季施工质量控制要点及未来发展方向,为寒冷地区混凝土施工提供理论依据与实践指导。

关键词: 混凝土冬季施工;冻害机理;防冻措施;蓄热法;外加剂技术

引言

我国北方地区冬季漫长,气温普遍低于0℃,部分地区极端低温可达-30℃以下。在此环境下,混凝土水化反应速率显著降低,当温度降至0℃时,水分结冰导致体积膨胀约9%,产生内部应力破坏混凝土结构。据统计,冬季施工的混凝土工程中,因冻害导致的强度损失可达30%-50%,裂缝发生率增加2-3倍,严重影响工程耐久性。因此,研究冬季混凝土施工关键技术及防冻措施具有重要工程价值。

1 冬季混凝土冻害机理分析

1.1 水分相变影响

混凝土中水分存在形式包括自由水、吸附水及结晶水。当环境温度降至0℃以下时,自由水首先结冰,形成冰晶-未冻水两相体系。随着温度持续降低,吸附水逐渐冻结,导致混凝土内部孔隙压力急剧上升。试验表明,当含水量超过临界值(约4.5%)时,冻胀压力可超过混凝土抗拉强度,引发微观裂缝。

1.2 水泥水化抑制

水泥水化反应是混凝土强度发展的基础,其反应速率与温度呈指数关系,符合Arrhenius方程:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

式中: k 为反应速率常数; E_a 为活化能(约40-50kJ/mol); T 为绝对温度。当温度从20℃降至0℃时,水化反应速率降低约60%,导致早期强度发展缓慢。

1.3 临界强度理论

混凝土在负温环境下需达到一定强度(临界强度)才能抵抗冻胀应力。国内外研究表明,C30混凝土在-5℃环境下的临界强度约为4MPa,-15℃时需达到7MPa。未达临界强度前受冻,强度损失率与受冻温度呈线性关系。

2 冬季混凝土施工关键技术

2.1 原材料选择与控制

水泥: 优先选用早强型硅酸盐水泥(P·O42.5R),其3d抗压强度可达普通水泥7d强度的1.2-1.5倍。同时,水泥的细度也会影响水化反应速率,较细的水泥颗粒具有更大的比表面积,能加速水化反应,但过细的水泥会增加需水量,对混凝土性能产生不利影响,因此应合理控制水泥细度。

骨料: 严格控制含泥量($\leq 1.5\%$),避免使用含冰、雪及有机杂质的骨料。细骨料宜选用中砂(细度模数2.3-3.0),其级配良好,能填充粗骨料间的空隙,提高混凝土的密实性^[1]。粗骨料最大粒径不超过钢筋间距的3/4,以保证混凝土能充分包裹钢筋,同时便于振捣密实。在冬季施工中,骨料的温度也会影响混凝土的温度,必要时可对骨料进行预热处理。

外加剂: 复合型防冻剂应包含减水组分(萘系或聚羧酸系)、早强组分(硫酸钠、三乙醇胺)及引气组分(松香酸钠)。典型配比为:减水剂1.5%、早强剂3.0%、引气剂0.005%。减水剂可减少用水量,降低混凝土的水灰比,提高强度和耐久性;早强剂能加速水泥水化反应,提高早期强度;引气剂可引入均匀分布的微小气泡(直径50-200μm),缓冲冻胀压力,提高混凝土的抗冻性。

2.2 配合比优化设计

水灰比控制: 根据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204-2015),冬季施工水灰比不宜大于0.5。采用高效减水剂可将水灰比降至0.4以下,显著提高抗冻性。降低水灰比可减少混凝土中的自由水含量,降低冻胀压力,同时提高混凝土的密实性和强度。

掺合料应用: 粉煤灰掺量宜控制在15%-20%,矿渣

粉掺量不超过30%。复合掺合料可改善混凝土孔结构,降低冰点温度约2-3℃。粉煤灰中的微珠颗粒可填充混凝土孔隙,提高密实性;矿渣粉具有潜在的水化活性,能与水泥水化产物发生二次水化反应,生成更多的水化产物,提高混凝土的强度和耐久性。

含气量调控:引气剂可引入均匀分布的微小气泡,缓冲冻胀压力。含气量控制在3.5%-4.5%时,抗冻等级可达F300以上^[2]。但含气量过高会降低混凝土的强度,因此需要根据工程要求和环境条件合理控制含气量。

2.3 加热保温工艺

2.3.1 原材料加热

一是水加热:采用蒸汽锅炉或电加热器,水温控制在60-80℃,最高不超过100℃。过高的水温会导致水泥假凝,影响混凝土性能。加热后的水应先与骨料混合,再加入水泥,避免水泥与高温水直接接触。二是骨料加热:优先采用蒸汽加热法,粗骨料加热温度不宜超过60℃,细骨料不超过40℃。加热温度过高会使骨料内部结构发生变化,影响混凝土强度。可采用蒸汽管道直接通入骨料堆中进行加热,也可将骨料放入封闭的加热仓内进行加热。三是投料顺序:热水→骨料→水泥,避免水泥与高温水直接接触导致“假凝”。水泥假凝会使混凝土在短时间内失去流动性,无法正常浇筑和振捣,严重影响施工质量。

2.3.2 混凝土搅拌与运输

搅拌时间延长30-60s,确保温度均匀。低温下混凝土各组分的反应速度减慢,需要更长的搅拌时间使水泥充分水化,各原材料混合均匀。运输车罐体包裹保温层,输送管道采用岩棉被包裹,减少热量损失。在运输过程中,混凝土会与外界环境进行热交换,导致温度下降。采用保温措施可有效降低热量损失,保证混凝土入模温度符合要求。

2.3.3 浇筑工艺控制

模板及钢筋表面温度不低于2℃,清除冰雪污垢。模板和钢筋上的冰雪污垢会影响混凝土与它们的粘结性能,降低结构整体性。可采用热风枪或蒸汽对模板和钢筋进行预热和清理。分层浇筑厚度控制在400mm以内,上下层间隔时间不超过初凝时间。分层浇筑可使混凝土内部热量均匀分布,避免出现温度梯度过大导致的裂缝^[3]。上下层间隔时间过长会使上下层混凝土之间形成冷缝,影响结构强度和耐久性。入模温度控制方面,严寒地区 $\geq 10^{\circ}\text{C}$,一般地区 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。入模温度过低会导致混凝土早期受冻,影响强度发展。可通过测量混凝土出机温度和运输过程中的温度损失,合理调整原材料加热温度和保温措

施,确保入模温度符合要求。

3 综合防冻措施体系

3.1 蓄热法

适用于最低气温不低于-15℃、结构表面系数的工程。技术要点:(1)覆盖材料:塑料薄膜+5cm厚草帘+30cm厚细土复合保温层。塑料薄膜可阻止水分蒸发,保持混凝土表面湿润;草帘和细土具有良好的保温性能,可减少热量散失。(2)温度监测:埋设测温管,每2h测量一次内部温度。通过实时监测混凝土内部温度,可及时调整保温措施,确保混凝土温度在合理范围内。(3)养护时间:延长至14d以上,确保强度达到设计值70%。低温下混凝土强度发展缓慢,需要更长的养护时间才能使混凝土达到设计强度要求。

3.2 暖棚法

适用于薄壁结构及钢筋密集工程。典型案例:某高铁桥墩工程采用装配式钢骨架暖棚,棚内温度维持在5-10℃。装配式钢骨架暖棚具有搭建方便、可重复使用的优点,能快速为混凝土施工提供适宜的温度环境。加热方式为锅炉蒸汽加热+红外线辐射加热组合系统。锅炉蒸汽加热可提供均匀的热量,使棚内温度整体升高;红外线辐射加热可直接作用于混凝土表面,提高表面温度,减少内外温差。单位面积热耗 $\leq 150\text{W}/\text{m}^2$,较传统火炉加热节能40%。通过优化加热系统和保温措施,可有效降低能耗,减少施工成本。

3.3 外加剂法

防冻剂通过降低冰点(可达-25℃)和促进水化反应,实现负温硬化。防冻剂中的减水组分可减少混凝土中的自由水含量,降低冰点;早强组分可加速水泥水化反应,提高早期强度;引气组分可引入微小气泡,缓冲冻胀压力。氯盐类防冻剂掺量不得超过水泥质量的1%,且需复配阻锈剂^[4]。氯盐类防冻剂虽然能有效降低冰点,但过量使用会导致钢筋锈蚀,影响结构耐久性。因此,在使用氯盐类防冻剂时,应严格控制掺量,并复配阻锈剂以保护钢筋。

3.4 电热法

一是电极加热:将钢筋作为电极,通入低压直流电(24-36V),电流密度控制在0.5-1.0A/mm²。电极加热利用电流通过钢筋产生的焦耳热来加热混凝土,具有加热均匀、温度控制方便的优点。但需要注意电流密度过大会导致钢筋发热过高,影响混凝土性能;电流密度过小则加热效果不佳。二是电热毯法:在模板外侧铺设碳纤维电热膜,功率密度200-300W/m²。碳纤维电热膜具有发热均匀、升温快、节能等优点,能有效提高混凝土表

面温度,减少内外温差。三是温度控制:采用PID智能温控系统,精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。PID智能温控系统可根据设定的温度自动调节加热功率,使混凝土温度始终保持在设定范围内,避免温度波动过大对混凝土性能产生不利影响。

4 工程应用案例分析:某大型水利枢纽工程

大坝混凝土总量达120万 m^3 ,冬季施工期长达5个月且最低气温 -22°C ,因工程规模大、施工周期长,冬季施工难度大,对混凝土性能要求颇高。技术方案上采用“蓄热法+复合防冻剂”组合工艺,蓄热法利用混凝土自身水化热和保温材料减少热量散失,复合防冻剂降低冰点、促进水化反应以提高混凝土低温性能;防冻剂配方为亚硝酸钠3%+三乙醇胺0.05%+木质素磺酸钙1.0%,其中亚硝酸钠降低冰点且有早强作用,三乙醇胺加速水泥水化反应,木质素磺酸钙减水和引气以改善混凝土工作性能;保温措施采用双层塑料薄膜+10cm厚聚苯板+彩钢板封闭,双层塑料薄膜阻止水分蒸发,聚苯板保温,彩钢板防护并延长保温层寿命。实施效果显著,混凝土出机温度 $12\sim 15^{\circ}\text{C}$,入模温度 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$,通过合理控制原材料加热温度及搅拌、运输保温措施确保入模温度符合要求;28d强度达设计值115%,抗冻等级F300,综合防冻措施使混凝土低温下正常水化反应,强度发展良好且抗冻性能满足要求;较传统蒸汽养护节约成本28%,因该组合工艺减少了能源消耗。

5 冬季施工质量控制要点

温度监控体系:建立大气温度、原材料温度、混凝土内部温度三级监测网络,数据实时上传至云平台。通过实时监测温度数据,可及时掌握混凝土施工过程中的温度变化情况,为调整保温措施提供依据。云平台可实现对温度数据的远程监控和管理,提高施工管理的效率。

强度检验制度:除标准养护试件外,增设两组同条件养护试件,用于拆模强度判定。标准养护试件是在标准条件下(温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,相对湿度95%以上)养护的试

件,用于评定混凝土的强度等级;同条件养护试件是与结构实体在同一环境下养护的试件,其强度更能反映结构实体的实际强度。通过增设同条件养护试件,可准确判断拆模时间,避免因拆模过早导致结构损坏。

裂缝控制措施:掺入 $0.8\sim 1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 膨胀剂补偿收缩。膨胀剂在水化过程中会产生体积膨胀,补偿混凝土的收缩,减少裂缝的产生。二次抹面后立即覆盖塑料薄膜保湿。二次抹面可使混凝土表面更加平整光滑,覆盖塑料薄膜可阻止水分蒸发,保持混凝土表面湿润,减少干缩裂缝。拆模后涂刷水性渗透结晶型防水涂料。水性渗透结晶型防水涂料可渗透到混凝土内部,与水泥水化产物发生化学反应,生成不溶于水的结晶体,堵塞混凝土孔隙,提高混凝土的抗渗性能和耐久性,同时也能起到一定的防裂作用。

6 结语

研究结论表明,复合防冻技术(蓄热法+外加剂+电热辅助)可有效解决 -20°C 环境下混凝土施工难题,优化配合比设计能显著提高抗冻性能,智能温控系统可将温度波动控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内,提高施工质量稳定性。未来展望方面,可研发纳米改性防冻剂以降低冰点温度,推广相变储能材料在混凝土保温中的应用以减少能耗,建立基于BIM技术的冬季施工全过程模拟平台,提前预测问题并采取预防措施,实现精准温控,提升施工质量和效率。

参考文献

- [1]雷建维.冬季混凝土施工质量保障措施[J].中国水泥,2025,(07):85-87.
- [2]赵广亭.冬季施工中混凝土防冻裂技术及工程实践研究[J].石化技术,2025,32(07):415-417.
- [3]黄思远.冬季房建工程混凝土施工养护技术分析[J].中国建筑装饰装修,2025,(12):170-172.
- [4]张力.混凝土冬季施工中建筑工程技术的应用[J].住宅与房地产,2025,(17):95-97.