

大体积混凝土施工技术 with 裂缝控制策略

皇甫星成

新疆昆仑工程咨询管理集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文系统探讨了大体积混凝土施工技术的核心要点,包括原材料选择、浇筑工艺、温度监测与调控等关键环节,并深入分析了裂缝产生的机理与控制策略。基于温度应力理论,提出了分层分块施工、冷却水管降温、预应力与纤维增强等专项技术措施,结合工程实践案例验证了其有效性。研究结果为提升大体积混凝土施工质量、降低裂缝风险提供了理论依据与实践指导。

关键词: 大体积混凝土; 施工技术; 裂缝控制; 温度应力; 分层浇筑

引言: 大体积混凝土凭借其体积庞大、水化热释放集中以及复杂约束条件等特性,在施工阶段极易因温度应力与收缩变形产生裂缝,这不仅会削弱结构承载力,还会加速钢筋锈蚀、降低耐久性,甚至引发安全隐患。本文结合实际工程案例与理论研究成果,从原材料优化、浇筑工艺改进、温度监测与调控等方面系统梳理施工技术要点,并针对裂缝成因提出分层分块施工、冷却水管降温、预应力补偿等专项控制策略,以期同类工程提供科学指导。

1 大体积混凝土施工技术要点

1.1 原材料选择与配比优化

大体积混凝土施工的首要任务是降低水化热释放,减少温度裂缝风险。(1) 水泥选择: 优先采用低水化热水泥,如矿渣硅酸盐水泥(P·S)和粉煤灰水泥(P·F)。此类水泥通过掺入矿渣或粉煤灰,显著降低硅酸三钙(C₃S)和铝酸三钙(C₃A)含量,水化热释放量较普通硅酸盐水泥(P·O)减少20%~30%。例如,P·S42.5水泥的7d水化热约为250kJ/kg,而P·O42.5水泥则高达300kJ/kg。(2) 骨料与掺合料: 粗骨料选用连续级配的碎石或卵石,粒径范围5~31.5mm,含泥量≤1.0%。连续级配可减少空隙率,提高混凝土密实性,降低收缩变形。细骨料采用中粗砂(细度模数2.3~3.0),避免细砂增加需水量,导致混凝土干缩。掺合料掺入粉煤灰(I级或II级)和矿渣粉(S95级),替代部分水泥(替代率20%~40%),降低水化热,同时通过火山灰效应改善后期强度。例如,粉煤灰掺量20%时,混凝土28d抗压强度可提高5%~10%。(3) 外加剂应用: 减水剂掺入聚羧酸高效减水剂,减水率≥25%,降低水胶比至0.35~0.45,减少用水量,提升混凝土流动性。膨胀剂采用钙矾石型膨胀剂(如UEA),补偿混凝土收缩,掺量6%~8%(占胶凝材料总量),可减少收缩裂缝30%以上。

1.2 浇筑工艺与分层控制

浇筑工艺直接影响混凝土的均匀性与密实度,需严格分层控制。(1) 分层浇筑方法: 全面分层适用于平面尺寸较小的结构,逐层连续浇筑,每层厚度≤500mm,确保上下层浇筑间隔时间不超过初凝时间(通常为4~6h)。分段分层适用于长度较大的结构,按长度方向分段,每段宽度≤15m,逐层浇筑,减少混凝土浇筑量,降低温度应力^[1]。斜面分层适用于长度超过厚度3倍的结构,混凝土从一端向另一端斜坡推进,每层厚度≤300mm,保证混凝土自然流动,避免离析。(2) 振捣密实: 采用插入式振捣棒,振捣间距≤1.5倍振捣棒作用半径(通常为300~400mm),振捣时间20~30s/点,避免漏振(导致蜂窝麻面)和过振(引起离析)。振捣棒插入下层混凝土深度≥50mm,确保层间结合良好,防止形成施工冷缝。

1.3 温度监测与调控

温度监测与调控是防止温度裂缝的核心措施。(1) 实时监测: 埋设温度传感器(如热电偶或光纤传感器),监测混凝土中心、表面及环境温度。(2) 温度控制标准: 中心温度与表面温度差≤25℃,避免因温度梯度过大产生拉应力;表面温度与环境温度差≤20℃,防止表面骤冷收缩;降温速率≤2℃/d,避免快速降温导致收缩裂缝。(3) 冷却水管: 在混凝土内部预埋φ25~φ32mm的PVC或钢管,间距1.0~1.5m,呈“蛇形”或“井字形”布置。浇筑后12h内通入循环水(水温≤20℃),流量≥0.6m³/h·m,持续通水7~14d,直至内部温度降至环境温度+15℃。冷却水管使用后需灌浆封闭,防止锈蚀影响结构耐久性。

2 裂缝控制策略与理论依据

2.1 温度应力理论

(1) 大体积混凝土裂缝的核心诱因是水化热效应。

水泥水化反应过程中，每克胶凝材料释放约502J热量，导致混凝土内部温度急剧升高。以C30混凝土为例，若单方水泥用量为350kg，水化热总量可达175.7MJ，使混凝土中心温度在浇筑后3~5天内升至60~70℃，而表面温度受环境影响仅30~40℃，形成30℃以上的内外温差。（2）温度应力形成机制：混凝土在升温阶段因体积膨胀受外部约束（如模板、地基）限制，产生压应力；降温阶段因收缩受内部约束（如已硬化混凝土层）限制，产生拉应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度（约2.0~3.0MPa）时，即产生裂缝。温度应力计算需综合考虑热传导方程（描述温度场分布）与弹性力学理论（分析应力-应变关系），通过有限元模拟可预测裂缝风险区域，指导施工参数调整。

2.2 约束条件优化

约束条件是温度应力的放大器，优化约束条件可显著降低裂缝风险。（1）分层分块施工：后浇带宽度800~1000mm，间距20~30m，两侧混凝土浇筑后40~60d封闭。后浇带通过释放早期温度应力，避免连续结构因温差过大产生贯通裂缝。施工缝设置于结构受力较小部位（如柱基顶面、梁底），采用阶梯形或凹槽形构造，增强层间抗剪能力。（2）滑动层与隔离层：滑动层在基础与地基之间铺设聚乙烯薄膜或砂垫层，摩擦系数降至0.1以下，降低水平约束力^[2]。隔离层在结构层间设置沥青油毡或橡胶板，阻断竖向约束传递。（3）工程案例：某大型水电站基础底板（尺寸50m×30m×3m）采用后浇带+滑动层组合措施，施工期间混凝土中心温度达65℃，但表面裂缝宽度控制在0.1mm以内，远低于设计限值0.2mm。

2.3 养护措施与温度梯度控制

养护是裂缝控制的最后一道防线，需兼顾保湿与保温双重目标。（1）保湿养护：覆盖法，浇筑后12h内覆盖塑料薄膜或土工布，减少水分蒸发。喷淋法，高温季节采用自动喷淋系统，保持混凝土表面湿润，养护时间 $\geq 14d$ 。效果验证，保湿养护可使混凝土干缩率降低40%~60%，显著减少表面裂缝。（2）保温措施：冬季保温覆盖草袋、棉毡或电热毯，维持表面温度 $\geq 5^\circ C$ ，防止冻融破坏。夏季遮阳采用遮阳网或喷淋降温，避免表面温度骤升。（3）温度梯度控制：分层浇筑每层厚度 $\leq 500mm$ ，缩短层间浇筑间隔时间，减少温度梯度。冷却水管预埋 $\phi 25\sim\phi 32mm$ 的PVC管，浇筑后12h内通入循环水，控制内部温度 $\leq 60^\circ C$ 。技术对比：某高层建筑核心筒施工（层高5m），采用常规养护与冷却水管结合，混凝土内外温差控制在20℃以内，裂缝发生率较传统工艺

降低70%。

3 裂缝控制专项技术措施

3.1 预应力与纤维增强技术

（1）预应力筋布置：在混凝土结构构建之初，科学合理地在混凝土内部精心设置预应力筋，这是一项极具前瞻性的抗裂举措。通过专业设备对预应力筋精准施加预压应力，使其在混凝土未承受外部荷载时，内部就预先储存了一定的压应力。当混凝土后续遭遇温度变化，尤其是温度降低产生拉应力时，这部分预压应力便能及时发挥作用，如同一位坚毅的“守护者”，有效抵消温度变化所引发的拉应力，极大地降低混凝土开裂的风险，为结构的耐久性保驾护航。（2）纤维混凝土：将钢纤维、聚丙烯纤维等按照精确的配合比均匀掺入混凝土之中，能够使混凝土的性能得到质的飞跃。钢纤维凭借其高强度、高弹性模量的特性，在混凝土内部形成一张张坚韧的“微筋网”，如同给混凝土穿上了一层坚固的铠甲，有效约束混凝土的变形，当裂缝有萌生迹象时，钢纤维能够凭借自身的抗拉能力，顽强地阻止裂缝的进一步扩展。聚丙烯纤维则以其细密的分布和良好的分散性，填充于混凝土的孔隙之间，不仅增强了混凝土的密实度，而且在混凝土受力变形时，起到缓冲和牵制的作用，二者协同发力，全方位提升混凝土的抗裂性能，使其能够从从容应对各种复杂工况。

3.2 施工缝与后浇带设计

（1）施工缝处理：施工缝是混凝土浇筑间断面，其处理直接影响结构防水与整体性能。采用凹槽接缝时，在浇筑前预设规则凹槽，后续混凝土嵌入后形成榫卯咬合结构，显著增强连接强度与防水性；止水钢板则通过垂直设置特制钢板，两侧翼缘埋入相邻混凝土，利用其不透水性阻隔水流，确保施工缝防水性能^[3]。两种方法结合使用，可有效降低施工缝渗漏风险，提升结构耐久性。（2）后浇带封闭：后浇带用于应对混凝土硬化收缩变形，其浇筑时间需精准控制。一般建议在两侧混凝土浇筑后60天以上进行，此时早期收缩变形已基本完成，补偿收缩混凝土可填充空隙，利用膨胀特性产生适度压应力，补偿收缩变形，恢复结构整体性，预防裂缝。后浇带施工需严格遵循设计规范，确保材料性能与浇筑质量，以实现结构整体性优化与裂缝防控目标。

3.3 特殊环境下的裂缝控制

（1）低温环境裂缝控制：低温环境下，混凝土易因受冻产生裂缝。核心措施包括：一是掺入防冻剂，通过降低混凝土冰点，使其在低温下仍保持液态，保障水化反应持续进行；二是采用加热搅拌水，将拌合用水温度

提升至40~60℃, 确保混凝土入模温度 $\geq 5^\circ\text{C}$, 避免因早期受冻导致内部结构破坏。此外, 浇筑后需覆盖保温材料(如棉毡、电热毯), 维持表面温度, 延长保温养护时间至14天以上。(2) 高温环境裂缝控制: 高温施工时, 混凝土易因失水过快、水化反应剧烈引发收缩裂缝。控制策略为: 一是避开10:00~16:00高温时段, 选择夜间施工, 降低入模温度; 二是设置喷淋装置, 对混凝土表面及模板持续喷淋, 通过水分蒸发带走热量, 维持表面温度 $\leq 30^\circ\text{C}$ 。同时, 采用低热水泥(如矿渣硅酸盐水泥)并预埋冷却水管, 进一步降低内部温度, 抑制裂缝发展。

4 工程实践与质量控制

4.1 典型工程案例

(1) 某桥梁墩台施工: 在该项目中, 面对墩台大体积混凝土浇筑极易产生裂缝的难题, 施工团队精心制定方案。采用分层浇筑技术, 严格控制每层浇筑厚度, 确保混凝土在水化过程中热量均匀散发, 避免局部过热。同时, 巧妙布置冷却水管, 宛如给墩台植入“降温脉络”, 在混凝土浇筑过程中及后期养护阶段, 持续通入循环冷水, 精准带走内部热量, 成功将内外温差控制在安全阈值内, 有效规避了裂缝隐患, 保障了墩台结构的稳固性与耐久性, 为桥梁的长期安全运营奠定坚实基础。(2) 高层建筑基础: 考虑到高层建筑基础承载巨大压力, 对混凝土抗裂性能要求极高。施工方果断引入预应力技术, 在基础混凝土中合理布设预应力筋, 提前施加预压应力, 抵消后续可能产生的拉应力。配合使用纤维混凝土, 钢纤维与聚丙烯纤维均匀分散其中, 极大增强了混凝土的韧性与抗拉强度。二者相辅相成, 显著提升了基础的抗裂能力, 即便在复杂的地质条件与重载作用下, 依然能维持结构的完整性, 确保高层建筑屹立不倒。

4.2 质量检测与验收标准

(1) 温度监测数据: 在混凝土施工全程, 利用高精度温度传感器多点位、实时监测混凝土内外温度。记录详实的温度变化曲线, 密切关注内外温差及降温速率, 严格依据规范要求, 一旦发现温差接近或超出限定值(如大体积混凝土内外温差不宜超过 25°C), 立即启动

应急预案, 调整养护措施, 确保混凝土质量稳定可控^[4]。

(2) 裂缝宽度检测: 待混凝土达到一定龄期, 采用专业的裂缝测宽仪, 沿结构表面细致扫描。重点检测关键受力部位、施工缝及易出现裂缝区域, 查看裂缝宽度是否逾越允许值(如一般环境下裂缝宽度不超过 0.2mm)。若发现超标裂缝, 组织专家深入分析成因, 制定修复方案, 保障结构安全。

4.3 未来发展趋势

(1) 智能化监测: 随着物联网技术蓬勃发展, 未来工程将广泛应用智能传感器, 构建混凝土实时监测网络。通过无线传输, 将温度、应力等关键数据实时汇聚至云端平台, 利用大数据分析 with 人工智能算法, 精准预测裂缝风险, 一旦异常立即自动预警, 实现从被动应对到主动防控的转变。(2) 新型材料: 科研人员持续发力, 致力于研发创新材料。自修复混凝土宛如拥有“自愈能力”, 内部含有的特殊胶囊或细菌, 在裂缝出现时能自动释放修复物质, 填充裂缝; 纳米改性材料凭借纳米尺度的独特性能, 优化混凝土微观结构, 全方位提升抗裂性能, 为工程建设注入强大科技动力。

结语

大体积混凝土施工技术的核心在于优化材料、工艺与监测手段, 而裂缝控制的关键在于降低温度应力与收缩变形。通过分层分块施工、冷却水管降温、预应力与纤维增强等专项技术措施, 可有效降低裂缝风险。未来, 需进一步探索智能化监测与新型材料的应用, 推动大体积混凝土施工技术的发展。

参考文献

- [1]孙斌.建筑工程施工运用大体积混凝土技术的要点分析[J].陶瓷,2023,(08):136-138+159.
- [2]张坤.建筑工程大体积混凝土材料的性能与结构施工工艺研究[J].居舍,2023,(22):56-58.
- [3]白治琴.建筑工程施工中大体积混凝土裂缝控制技术[J].工程机械与维修,2023,(04):158-160.
- [4]国倩磊.住宅建筑工程中大体积混凝土结构施工技术研究[J].居舍,2023,(19):44-46.