

建筑工程大体积混凝土裂缝控制技术

文 / 罗鑫成 广东博仁工程顾问有限公司

摘要：大体积混凝土结构在现代工程中应用广泛，但其易产生裂缝，严重影响结构耐久性和安全性。本文分析了大体积混凝土裂缝产生的主要原因，包括温度应力、约束变形、材料因素和施工因素。针对这些问题，本文提出了相应的控制技术，包括优化配合比设计，合理选用原材料，科学控制施工工艺，完善温度控制措施以及加强保温养护管理。旨在为工程实践提供指导，提高大体积混凝土结构的质量和耐久性，确保工程安全可靠。

关键词：大体积混凝土；裂缝；温度应力；施工工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.016

引言

大体积混凝土指结构体积大、水泥水化热量高，易产生温度裂缝的混凝土结构。其特点是体积大、水化热高、温差大、易开裂。应用范围广泛，主要用于水利水电工程的大坝、核电站的反应堆屏蔽层、大型桥墩、高层建筑的底板和地下室等，这些结构对混凝土的耐久性和稳定性要求极高，因此有效控制裂缝至关重要。

一、大体积混凝土裂缝的危害

大体积混凝土裂缝根据其产生的部位和尺寸可分为表面裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝三种类型。表面裂缝在混凝土构件表层呈现网状分布，宽度一般在0.05~0.15mm之间，深度一般不超过40mm，这类裂缝虽不会直接降低结构的整体性能，但会降低混凝土的抗渗等级，且在长期外部环境作用下容易向深层发展。深层裂缝延伸至混凝土内部，深度可达300mm，这类裂缝使混凝土的抗渗等级下降，同时使混凝土的抗压强度降低^[1]。贯穿裂缝完全穿透混凝土构件，当出现贯穿裂缝后，混凝土结构的抗弯承载力降低35%~50%，抗剪承载力降低40%~60%。裂缝的存在会导致结构耐久性下降，环境介质可通过裂缝侵蚀混凝土内部及钢筋，引起钢筋锈胀，加速结构劣化；裂缝还会降低结构的抗渗性能，造成渗漏，影响使用功能；对于受力构件，裂缝会改变原有应力分布状态，削弱结构承载能力，严重时可能导致结构失效；裂缝的存在还会影响建筑物的美观性和适用性，增加后期维护成本。在大体积混凝土施工过程中，必须采取有效的控制措施，预防和控制裂缝的产生和发展。

二、裂缝产生的原因分析

(一) 温度应力

混凝土浇筑后，水泥发生水化反应释放大热量，由于混凝土导热系数较低（约1.28W/m·K），内部积累的热量难以及时散失。这导致混凝土内部温度迅速升高，在浇筑后48—72小时内达到温度峰值，最高温度可达65—75℃。混凝土表层受外界环境影响，温度相对较低，形成显著的温度梯度。混凝土内外温差通常能达到20—30℃，部分工程甚至超过35℃。这种温度上的明显差异使混凝土产生不均匀体积变形，内部产生压应力，

表层产生拉应力。由于混凝土抗拉强度仅为抗压强度的1/10—1/20左右，在早期水化阶段抗拉强度更低，当拉应力超过混凝土的抗拉强度时便会出现裂缝。尤其是在冬季施工时，环境温度较低加剧了内外温差，使温度应力效应更为显著。此外，混凝土中的水泥用量对温度应力也有重要影响，当水泥用量超过400kg/m³时，水化热的累积效应更加明显。温度应力不仅与温度梯度有关，还与混凝土的弹性模量、线膨胀系数（约 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）和徐变特性密切相关，这些因素共同作用形成了复杂的应力状态^[2]。

(二) 约束变形

建筑工程大体积混凝土结构在承受外部荷载时会产生一定的变形，当这种变形受到内外约束时便会在混凝土内部形成应力。外部约束主要来自基础岩体对混凝土底部的约束作用以及新浇混凝土与已硬化混凝土之间的约束。当基础弹性模量达到15GPa时，其约束作用可使混凝土产生高达2.5MPa的拉应力。内部约束一般来源于混凝土内外温差引起的不均匀变形，这种变形在混凝土浇筑后3~5天内最为明显。当混凝土表层与内部温差超过25℃时，内部约束作用显著增强。大体积混凝土结构中，约束应力与结构尺寸相关，一般情况下，当结构厚度超过1.5m时，约束应力会随厚度增加而升高。在相同配合比条件下，3m厚度混凝土结构的约束应力比1.5m厚度的高出35%~45%。此外，混凝土的弹性模量发展规律对约束应力也有重要影响，在混凝土浇筑后7天内，随着弹性模量快速增长，约束应力会呈非线性上升趋势，这一阶段约束应力增长速率可达0.3—0.5MPa/d，图1为混凝土弹性模量与约束应力发展曲线。

(三) 材料因素

大体积混凝土的制备包含多种材料，这些材料的使用情况都会对裂缝产生造成一定影响。水泥方面，早强型和高强度等级水泥具有较高的水化热释放速率，易导致混凝土内部温度快速升高，加剧内外温差；水泥的细度过高也会加快水化反应速度，使混凝土的收缩变形增大。骨料方面，粗骨料的粒径如果过大，则容易引起混凝土内部应力集中，含泥量超标则会降低混凝土的强度和抗裂性能。细骨料的级配不合理会影响混凝土的和易

混凝土弹性模量与约束应力发展曲线

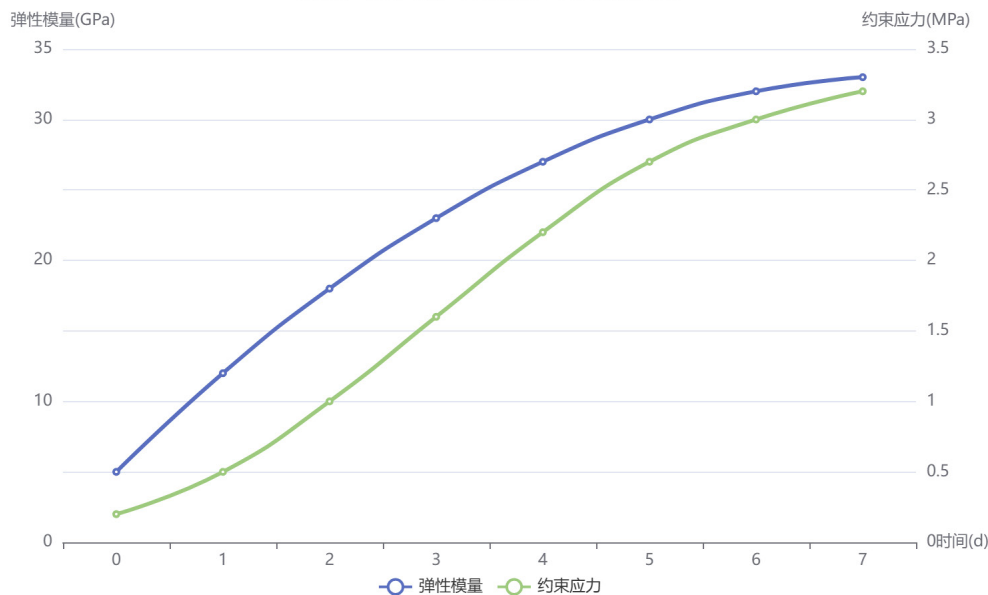


图1 混凝土弹性模量与约束应力发展曲线

性与密实度，导致结构薄弱点的形成。掺合料的选择和掺量失当也会引发裂缝问题，粉煤灰掺量过高会降低混凝土早期强度，矿渣粉掺量不当则影响混凝土的水化热释放特性。外加剂的使用不当同样会引起裂缝，减水剂用量过大会增加混凝土的收缩变形，引气剂掺量不合理会影响混凝土的密实度和强度发展^[3]。

(四) 施工因素

建筑工程现场施工存在很多不确定因素，都会工程的质量产生影响。在混凝土振捣中，过度振捣或振捣不足会导致材料离析，使混凝土内部结构疏松，产生蜂窝麻面和裂缝隐患。浇筑工序中，若分层厚度控制不当，会使下层混凝土过早凝结，形成施工冷缝。混凝土浇筑速度过快，会引起模板侧压力增大，造成结构变形。施工中未能及时进行二次抹面，使混凝土表层出现泌水或者干缩现象。模板支护体系刚度不足或者拆模时间不合理，会造成混凝土结构产生不均匀变形。此外，如果养护过程中覆盖不及时或者养护时间不足，使混凝土表面水分快速蒸发。这些施工因素交织在一起，使混凝土内部产生应力集中，最终导致裂缝的产生。

三、建筑工程大体积混凝土裂缝控制技术

(一) 优化混凝土配合比设计

优质的混凝土配合比需要综合考虑结构性能、施工工艺、温控要求等多项指标。一般来说，降低水泥用量能够有效减少水化热的积累，在满足强度要求的前提下，水泥用量宜控制在450~500kg/m³。合理掺入粉煤灰、矿渣粉等掺合料替代部分水泥，掺量可达胶凝材料总量的40%~50%，能有效降低混凝土的绝热温升值。水胶比对混凝土的和易性、强度及裂缝敏感性影响显著，工程中宜将其控制在0.45以内。砂率过高容易导致混凝土收缩变形增大，因此建议砂率控制在38%~42%之间。

针对拌合物的流动性，按照GB50496-2018规定，坍落度应控制在150±30mm范围内。在配合比设计阶段，混凝土的绝热温升值ΔT(t)可按式计算：

$$\Delta T(t) = (WQ/C_p \cdot \rho)(1 - e^{(-mt)})$$

其中W为每立方米混凝土的胶凝材料用量(kg)，Q为胶凝材料水化热总量(kJ/kg)，C_p为混凝土的比热容[kJ/(kg·℃)]，ρ为混凝土的密度(kg/m³)，m为与水泥品种、用量和入模温度等相关的系数，t为混凝土龄期(d)。通过该公式计算的温升值应控制在50℃以内。此外，粗骨料粒径宜选用5~31.5mm连续级配，含泥量应小于1%。为改善混凝土的工作性能，可适量添加高性能减水剂，掺量为胶凝材料质量的0.8%~1.2%，但需防止过量使用导致混凝土离析。

(二) 合理选用原材料

原材料选择直接影响结构质量及耐久性。水泥品种应优选低水化热硅酸盐水泥，其3天水化热不得超过250kJ/kg，7天水化热应控制在280kJ/kg以内，且52.5强度等级水泥的7天水化热需保持在300kJ/kg以下，水泥进场温度不宜高于60℃。细骨料宜选用中砂，其细度模数要求大于2.3，含泥量控制在3%以下；粗骨料应采用连续级配，粒径范围以5.0mm~31.5mm为宜，且含泥量须低于1%，必须选用非碱活性骨料以防止碱骨料反应。根据工程实践证明，掺和料的合理使用能显著改善混凝土性能，粉煤灰掺量以不超过胶凝材料用量的50%为宜，矿渣粉掺量应控制在40%以内，两者联合使用时总量不应超过胶凝材料用量的50%。外加剂的选用需重点关注其对混凝土收缩性能的影响系数，且在耐久性要求高或寒冷地区施工时，建议选用引气剂或引气减水剂。拌合用水须符合《混凝土用水标准》(JGJ 63-2006)的规定，水温不应过高。原材料进场时应对其品种、强度等级、

出厂编号等进行严格检查,并对强度、安定性、凝结时间等关键指标进行复检。为保证施工质量,施工单位应建立完善的原材料检验制度,确保每批进场材料性能指标满足设计要求。在材料储存环节,应注意防晒、防雨、防潮,避免环境因素对材料性能造成不利影响^[4]。

(三) 科学控制施工工艺

混凝土浇筑前需要对模板表面清理冲洗,且冲洗水温不宜超过 25℃,以减小温度应力。浇筑作业宜避开气温超过 32℃ 的高温时段,混凝土入模温度应控制在 5~30℃ 范围内。对于厚度大于 2m 的大体积混凝土结构,应采用分层浇筑方式,每层浇筑厚度宜为 300~500mm,下层混凝土未达到初凝状态时必须完成上层混凝土浇筑。振捣过程中振捣棒插入深度需超过下层混凝土 50~100mm,以保证层间结合质量。混凝土坍落度建议控制在 160~180mm 区间,且运输时间不应超过 90min。为避免混凝土出现离析现象,卸料高度严格限制在 2m 以内。浇筑作业中应密切关注混凝土的凝结情况,混凝土初凝前要进行二次抹面,抹面时间间隔建议为 1~2h。当浇筑体积较大时,宜采用后浇带分隔浇筑,后浇带宽度不小于 1m。施工缝处理要彻底清除松动骨料和软弱混凝土层,并用高压水冲洗干净,新旧混凝土结合面的粘结强度不应低于 1.2MPa。对于超长结构,可采用跳仓法施工,跳仓最大分块单向尺寸控制在 40m 以内,间隔施工时间不少于 7 天。混凝土浇筑过程中要重点监控钢筋、预埋件的位置,防止产生位移和变形。浇筑施工中还应注意温度场的均匀性,合理布置冷却水管,水管间距不宜大于 1.5m,进出口水温差控制在 10℃ 以内,流量保持在 10~20L/min 之间。

(四) 完善温度控制措施

温度控制的核心在于精准管理混凝土内部的水化热,将混凝土内部最高温度控制在合理的范围内,并有效降低内外温差。常用的温度控制技术包括预埋冷却水管系统、外表面冷却和表面保温措施。预埋冷却水管系统通过在混凝土浇筑前预埋管路,并在浇筑完成后通入冷却水(例如,温度控制在 10~15℃),实现对混凝土内部温度的主动控制。该系统的设计需考虑管路间距、管径、水流速度等参数,以确保冷却效果均匀,避免局部过冷或过热。例如,管间距可根据混凝土尺寸和水化热特性调整,一般控制在 500~1000mm 之间;水流速度则需根据实时温度监测数据动态调整,以维持混凝土内部温度在目标范围内(例如,最高温度不超过 65℃,内外温差小于 20℃)。外表面冷却方法,例如喷淋冷却,可通过向混凝土表面喷洒低温水(例如,15℃ 以下)来降低表面温度,但需注意控制喷水强度和频率,避免表面过湿或冲蚀。表面保温措施,例如覆盖保温材料(例如,草帘、保温被等),能有效降低混凝土表面热量散失,减缓温度下降速度,从而控制内外温差。保温材料的选择需考虑其保温性能、透气性等因素,以确保养护效果。此外,温度监测技术至关重要。通过在混凝土内部设置多个温度传感器(例如,热电偶),实时监测混凝土内部温度

分布,为冷却系统和保温措施的调整提供数据支持。例如,可以采用无线数据采集系统,实现远程监控和数据分析,以便及时发现并处理温度异常情况^[5]。

(五) 加强保温养护管理

养护措施应根据当地气候条件、混凝土配合比和结构尺寸等因素综合考虑。在炎热干燥的气候条件下,应优先采用洒水养护结合覆盖保湿的方法。洒水养护能够有效降低混凝土表面温度,保持混凝土内部水分平衡,一般建议洒水频率为每天 2~4 次,每次洒水量应使混凝土表面保持湿润状态而不积水。同时,采用草帘、土工布等材料覆盖混凝土表面,能够有效减少太阳辐射和风干作用,降低水分蒸发速率。在寒冷地区,则应重点关注保温措施,例如采用保温被覆盖,并辅以适当的加热措施,确保混凝土在整个养护期内温度保持在 5℃ 以上,避免因冻融循环导致的裂缝。养护时间的长短也直接影响混凝土的最终性能。一般情况下,大体积混凝土的养护时间不应少于 14 天,甚至更长,具体时间应根据混凝土的强度增长曲线和温度变化情况确定。此外,应定期监测混凝土的温度和湿度,根据监测数据及时调整养护方案,确保养护效果。例如,可通过埋设温度传感器,实时监测混凝土内部温度,当温度超过预设阈值(例如 70℃)时,及时采取降温措施,避免温度过高导致的裂缝。通过科学合理的保温养护管理,可以有效控制混凝土的温度和湿度,减少温度应力和干缩应力,最终降低大体积混凝土裂缝的发生率,提高工程质量。

结语

综上所述,大体积混凝土裂缝控制是一项系统工程,涉及材料科学、结构力学、施工技术等多个领域。有效控制裂缝不仅能够保障工程结构的耐久性和安全性,还能降低后期维护成本,具有显著的经济和社会效益。在工程实践中,应重视裂缝控制技术的综合应用,将材料优化、工艺控制、温度管理等措施有机结合,并不断探索新材料、新技术、新工艺,才能有效提高大体积混凝土结构的抗裂性能,确保工程质量,推动建筑行业可持续发展。

参考文献

- [1] 赵冬冬. 超厚大体积混凝土温度裂缝控制技术[J]. 科学技术创新, 2024, (23): 179-182.
- [2] 王荔武. 建筑工程地下室底板大体积混凝土施工技术要点[J]. 中国水泥, 2024, (11): 109-111.
- [3] 马一啸. 建筑工程大体积混凝土裂缝控制技术[J]. 居业, 2024, (10): 25-27.
- [4] 周姝航. 大体积混凝土结构裂缝成因及技术优化[J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(09): 150-152.
- [5] 江勇. 超长大体积混凝土结构早期裂缝的控制[J]. 中国水泥, 2024, (09): 97-100.

作者简介: 罗鑫成, 1994 年 11 月 25 日, 男, 汉, 江西, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。