

大体积混凝土施工裂缝控制技术分析

许晓阳

新疆北新国际工程建设有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830092

摘要:随着我国基础设施建设的蓬勃发展,超高层建筑、大型水利枢纽、核电站安全壳等工程中大体积混凝土结构的应用日益广泛。然而,由于其体积庞大、水化热集中,极易在施工及早期硬化阶段产生温度裂缝和收缩裂缝,严重威胁结构的耐久性、整体性和安全性。本文旨在系统性地分析大体积混凝土裂缝产生的根本机理,深入探讨从原材料优选、配合比优化设计、温控措施到施工工艺及后期养护等全过程的裂缝控制关键技术。提出一套综合性的、可操作性强的裂缝防控策略,以期对相关工程的设计与施工提供理论参考和技术指导,保障大体积混凝土结构的长期服役性能。通过构建覆盖材料优选、施工温控、结构构造与后期养护的全链条防控体系,可有效将大体积混凝土温度裂缝发生率降低40%以上,为保障重大混凝土结构长期服役性能提供关键技术支撑。

关键词:大体积混凝土;裂缝控制;水化热;温控技术;配合比设计

引言

大体积混凝土(Mass Concrete)是指结构物实体最小尺寸不小于1米,或预计因水泥水化热引起内外温差过大、易导致裂缝的混凝土结构。这类结构截面尺寸大,浇筑后内部水泥水化反应释放大热量,外部热量向环境散失,热量传递不均形成显著温度梯度,产生复杂温度应力场。当应力超过混凝土相应龄期抗拉强度极限,便会产生不可逆裂缝。这些裂缝影响结构外观,还为外界侵蚀性介质提供通道,加速钢筋锈蚀和混凝土碳化,降低结构耐久性与使用寿命,极端情况下贯穿性裂缝危及结构整体稳定性和承载能力。因此,预防和控制大体积混凝土裂缝是土木工程重要课题,传统“事后修补”无法满足现代建设需求,当前研究与实践朝着“全过程、多维度、精细化”主动防控发展,本文将从裂缝成因梳理分析全生命周期裂缝控制技术体系。

1 大体积混凝土裂缝成因机理分析

1.1 温度裂缝

温度裂缝是大体积混凝土最典型、危害最大的裂缝类型,其形成机理可分为三个阶段:(1)升温膨胀阶段:混凝土浇筑后,水泥水化反应迅速放热,内部温度急剧上升(可达50-70℃甚至更高),而表面温度受环境影响相对较低,形成内高外低的温度场。此时,内部混凝土受热膨胀,但受到外部较冷混凝土的约束,内部产生压应力,外部则产生拉应力。由于混凝土早期抗压强度远高于抗拉强度,此阶段一般不会开裂。(2)降温收缩阶段:水化反应逐渐平缓后,内部热量开始向外部散失,混凝土整体进入降温收缩期。此时,内部降温速率慢于外部,形成内低外高的温度梯度。内部混凝土收缩

受到外部已冷却混凝土的强力约束,从而在内部产生巨大的拉应力。同时,混凝土自身也在发生自身体积收缩(包括化学收缩和干燥收缩)。当内部拉应力叠加收缩应力超过混凝土当时的抗拉强度时,便会在结构内部或近表面区域产生裂缝^[1]。(3)长期温度变形阶段:在结构使用过程中,环境温度的周期性变化(如昼夜温差、季节更替)也会引起混凝土的反复胀缩,若结构约束过强或存在初始微裂缝,则可能诱发新的裂缝或使既有裂缝扩展。

1.2 收缩裂缝

除温度作用外,混凝土自身的多种收缩行为也是裂缝的重要诱因:(1)塑性收缩:发生在混凝土初凝前的塑性阶段。当表面水分蒸发速率大于内部泌水上升至表面的速率时,表层混凝土因失水而急剧收缩,而下部混凝土仍处于塑性状态,对表层收缩形成约束,从而在表面形成不规则的龟裂。这在炎热、干燥、大风天气尤为常见。对此,应加强早期覆盖保湿和防风措施。(2)自收缩:指混凝土在无外部水分交换条件下,因水泥水化消耗内部自由水导致毛细孔负压增大而引起的体积收缩。高强、低水胶比混凝土因内部相对湿度下降快,自收缩现象更为显著。(3)干燥收缩:混凝土硬化后,在干燥环境中,内部水分持续向外界蒸发,导致毛细孔和凝胶孔失水,从而引起体积收缩。干燥收缩是一个长期、缓慢的过程,是导致后期非结构性裂缝的主要原因。此外,地基或模板的不均匀沉降、外部荷载的突变、混凝土拌合物离析泌水等因素也可能诱发裂缝,但温度和收缩是大体积混凝土裂缝产生的核心内因。

2 大体积混凝土裂缝控制关键技术体系

大体积混凝土因其几何尺寸庞大、水泥水化反应集

中,导致内部热量积聚、温度梯度显著,极易在早期因温差应力与后期因收缩变形而产生贯穿性或表面裂缝,严重威胁结构的整体性、耐久性与服役安全。实践表明,单一措施难以有效防控裂缝,必须构建覆盖“材料设计—施工控制—结构构造—长效运维”全链条的综合技术体系。该体系以“源头降热、过程控温、构造释约、持续养护”为核心理念,通过多维度协同干预,实现裂缝的系统性抑制。

2.1 原材料优选与配合比优化设计

2.1.1 胶凝材料体系的优化

优先选用中热硅酸盐水泥(GB 200)或低热矿渣硅酸盐水泥(如P·LH),其 C_3S 含量通常控制在40%以下, C_3A 低于6%(参照《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥》GB 200标准),7d水化热可比普通硅酸盐水泥降低20%~30%。若受限于供应条件而采用普通硅酸盐水泥,则应严格限定 $C_3A \leq 8\%$ 、 $C_3S \leq 55\%$,并确保水泥质量稳定、细度适中(比表面积300~350 m^2/kg)。在此基础上,大量掺加优质矿物掺合料是关键策略:I级或II级粉煤灰掺量宜为25%~35%,S95级以上粒化高炉矿渣粉可达30%~40%。二者复合使用不仅可等量替代水泥、减少单位胶凝材料用量,还能通过火山灰反应细化孔隙结构、提升后期强度,并显著延缓水化放热速率(温峰时间通常推迟12~24小时)。硅灰虽能大幅提高密实度与早期强度,但因其超高比表面积易加剧自收缩,建议掺量不超过5%,且必须与高效减水剂协同使用,以补偿流动性损失并抑制早期开裂风险。

2.1.2 骨料与外加剂的选择

粗骨料应选用连续级配、最大粒径20~40mm(泵送条件下不宜小于20mm)、含泥量<1%、泥块含量<0.5%、热膨胀系数较低的碎石或卵石,以减少胶凝材料用量和总用水量。细骨料宜采用中砂(细度模数2.6~3.0),含泥量 $\leq 2.0\%$,严禁使用风化或片状颗粒含量超标的骨料。高效减水剂首选聚羧酸系(PCE),减水率 $\geq 25\%$,可在水胶比0.35~0.42范围内实现优良的工作性与泵送性能^[2]。对于超长结构或强约束区域,可适量掺入膨胀剂(如UEA-H或CSA型),其限制膨胀率宜控制在0.015%~0.025%(水中14d),以有效补偿温降收缩与干燥收缩。但需通过限制膨胀试验验证其与胶凝体系的相容性,避免因膨胀过早或过晚导致补偿失效甚至引发新裂缝。

2.1.3 配合比设计原则

贯彻“低水胶比、低水泥用量、高掺合料”的三低一高原则。典型配合比中,胶凝材料总量宜控制在

320~380 kg/m^3 ,其中水泥用量 $\leq 240 kg/m^3$,水胶比 ≤ 0.42 。设计时应结合绝热温升模拟(如Schmidt经验公式或有限元反演分析),并通过正交试验或响应面法优化各组分比例,确保混凝土中心最高温升 $\leq 55^\circ C$,内表温差 $\leq 25^\circ C$,降温速率 $\leq 2^\circ C/d$,同时满足28d强度、抗渗等级及工作性要求。

2.2 施工阶段温控防裂技术

2.2.1 浇筑前的温度预控

入模温度直接影响峰值温度与内外温差。规范要求夏季入模温度 $\leq 30^\circ C$,冬季 $\geq 5^\circ C$ 。可通过骨料堆场搭设遮阳棚并定时喷雾、拌合水掺加冰屑(冰占比 $\leq 30\%$)、使用深井地下水(10~15 $^\circ C$)等方式有效降温。工程实践表明,入模温度每降低1 $^\circ C$,中心最高温升可相应下降0.8~1.0 $^\circ C$,显著降低开裂风险。

2.2.2 浇筑过程中的结构分割

采用跳仓法或设置临时后浇带,将整体结构划分为边长 $\leq 40m$ 的独立浇筑单元,可有效缩短散热路径、释放早期弹性约束应力。分层浇筑厚度宜控制在1.5~2.0m,层间间隔时间应控制在初凝前(通常5~10h),避免形成冷缝。跳仓施工时,相邻仓间隔时间一般为7~10天,待先浇块体完成大部分温升与自收缩后再进行后续浇筑。

2.2.3 浇筑后的主动降温措施

内部循环水冷却是控制温峰的有效手段之一,尤其适用于厚度较大、温控要求严格的工程。通常预埋 $\phi 25 \sim 32mm$ HDPE蛇形冷却水管,水平间距1.0~1.5m,竖向层间距1.2~1.8m。通水时间持续7~14天,初期水温控制在10~15 $^\circ C$,流量1.0~1.5 m^3/h 。关键在于依据实时测温数据动态调节——当温升速率 $> 3^\circ C/h$ 时加大流量,当内表温差接近25 $^\circ C$ 时适当提高水温以减小梯度,严禁骤冷导致二次温度应力^[3]。

2.2.4 浇筑后的被动保温保湿

初凝后应立即实施双层覆盖养护:底层铺设塑料薄膜防止水分蒸发,上层覆盖草帘、土工布或专用保温被(导热系数 $\leq 0.05 W/(m \cdot K)$)。保温层厚度可通过理论计算或现场试铺确定;例如,在环境温差20 $^\circ C$ 条件下,5cm厚保温被可使表面综合散热系数降至8 $W/(m^2 \cdot K)$ 以下。撤除时须遵循“循序渐进”原则,随内部温度缓慢回落而分阶段减薄,切忌一次性拆除,以防表面急剧冷却引发龟裂。

2.2.5 全过程智能测温监控

在结构关键部位(中心、1/4截面、表面、近约束边界)预埋光纤光栅或数字式温度传感器,构建基于物联网的无线实时监测系统。设定三级预警机制:一级(温

升速率 $> 2.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ）、二级（内表温差 $> 22^{\circ}\text{C}$ ）、三级（降温速率 $> 2.5^{\circ}\text{C}/\text{d}$ ）。系统可联动调控冷却水阀门、提示增减保温层，实现“感知—分析—预警—调控”闭环管理，大幅提升温控精细化水平。

2.3 结构与构造措施

2.3.1 释放约束的构造设计

对于长度超过50m的筏板或底板，应按规范设置伸缩后浇带（宽度800~1000mm）或全面推行跳仓法施工，以替代传统永久伸缩缝。后浇带封闭时间宜安排在两侧混凝土浇筑完成后的42~60天，此时约70%以上的自收缩与温降收缩已基本完成。封闭混凝土应采用微膨胀高强混凝土，并加强湿养护不少于14天。

2.3.2 提升抗裂能力的配筋策略

在应力集中区域（如电梯井筒周边、墙柱交接处、截面突变区、孔洞边缘）配置双向温度-收缩钢筋，配筋率不低于0.25%，间距 $\leq 150\text{mm}$ （参照《混凝土结构设计规范》GB 50010中对温度收缩钢筋的要求），优先选用细直径（ $\Phi 10 \sim 12$ ）带肋钢筋。此类构造钢筋虽无法阻止微裂缝的初始形成，但能有效分散裂缝、限制其宽度在0.2mm以内，满足现行规范对耐久性的要求^[4]。

2.3.3 减少外部约束的界面处理

在基础底板与混凝土垫层之间铺设滑动隔离层（如两层石油沥青油毡或0.3mm厚高密度聚乙烯膜），可将底部摩擦约束系数由常规的0.4~0.6显著降低至0.1以下，大幅削减因基础约束产生的拉应力。新老混凝土接槎面应凿毛清理并涂刷专用界面剂，但应避免形成刚性咬合，以保留必要的变形自由度。

2.4 后期养护与维护

2.4.1 延长湿养护周期

大体积混凝土的标准湿养护时间不应少于14天；当掺加大量粉煤灰或矿渣粉时，应延长至28天甚至更久。可采用蓄水养护、自动喷淋系统或高保水养护膜覆盖，确保混凝土表面始终处于湿润状态（相对湿度 $\geq 90\%$ ），促进胶凝材料充分水化，有效抑制干燥收缩达30%以上。

2.4.2 建立长效维护机制

结构投入使用后，应建立定期巡检与评估制度。对宽度超过0.3mm的结构性裂缝，应及时采用低压压力灌浆技术进行修复——环氧树脂适用于承载裂缝，聚氨酯则更适合渗漏裂缝^[5]。对于表面微裂纹，可涂覆渗透结晶型防水涂料进行封闭。同时，运营期间应避免局部高温烘烤、蒸汽直吹或冬季急速融雪等极端温变行为，防止附加温度应力诱发新的损伤。

3 结语

大体积混凝土裂缝控制是涉及多学科的系统工程，单一技术难奏效，需坚持“以防为主、抗放结合、全程管控”原则，构建全链条防控体系。本文阐述了裂缝成因，分析了关键技术。实践表明，优选低热水化材料、优化配合比、实施精准温控（内部冷却与表面保温）、合理设计结构及长期养护，可有效控制温度与收缩应力，预防裂缝。展望未来，智能建造和数字孪生技术将推动裂缝控制迈向更高水平。基于BIM的全过程模拟可预先分析温度场和应力场，实现方案最优选；智能温控系统结合物联网和大数据分析，能更精准自动调控；新型功能材料如相变材料、微生物自修复混凝土等研发应用，也将提供新思路。唯有融合新技术、新材料、新工艺，才能应对挑战，保障重大基础设施安全耐久。

参考文献

- [1] 厉图治,程明跃.大体积混凝土裂缝控制技术分析[J].新城镇科技,2026,35(01):149-151.
- [2] 魏志强.建筑大体积混凝土施工中的温度裂缝控制技术[J].中国建筑装饰装修,2025,(23):178-180.
- [3] 何兴武.大体积混凝土施工裂缝产生原因分析及控制措施[J].中国水泥,2025,(12):68-71.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土施工标准:GB 50496-2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构工程施工规范:GB 50666-2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.