

混凝土裂缝的形成机理与全过程防控策略研究

徐建云

建德市永义建设工程检测有限公司

DOI:10.32629/bd.v9i6.4497

[摘要] 混凝土裂缝是土木工程领域的共性技术难题,成因复杂多元,贯穿于材料配制、结构设计、现场施工与服役维护的全生命周期。任何环节的控制疏漏都可能导致裂缝的显现并随时扩展开来。进而影响结构美观、使用功能、安全储备与长期耐久性。本文系统分析塑态收缩、沉陷收缩、干燥收缩、碳化收缩及凝结收缩等典型裂缝的形成机理,从材料优化、工艺改进与精细养护三个维度,提出分阶段、差异化的裂缝防控体系,为提升混凝土结构工程质量提供理论依据与实践指引。

[关键词] 混凝土裂缝; 形成机理; 收缩特性; 过程控制; 耐久性; 含泥量

中图分类号: TU528 文献标识码: A

Research on Formation Mechanism and Whole-Process Prevention and Control Strategies of Concrete Cracks

Jianyun Xu

Jiande Yongyi Construction Engineering Testing Co., Ltd.

[Abstract] Concrete cracks are a common technical challenge in the field of civil engineering, with complex and diverse causes that run through the entire lifecycle of material preparation, structural design, on-site construction, and service maintenance. Control omissions at any stage may lead to the appearance of cracks and their expansion over time, thereby affecting structural aesthetics, functionality, safety reserves, and long-term durability. This paper systematically analyzes the formation mechanisms of typical cracks such as plastic shrinkage cracks, settlement shrinkage cracks, drying shrinkage cracks, carbonation shrinkage cracks, and condensation shrinkage cracks. From three dimensions of material optimization, process improvement, and refined maintenance, a phased and differentiated crack prevention and control system is proposed, providing theoretical basis and practical guidance for improving the quality of concrete structure engineering.

[Key words] concrete crack; formation mechanism; shrinkage characteristic; process control; durability; clay content

1 混凝土裂缝对建筑结构的综合影响

在结构安全层面,裂缝直接导致构件有效截面削弱与刚度退化。研究表明,宽度仅为0.2mm的表面裂缝可使构件承载力降低5%~8%,而当裂缝扩展至钢筋表面时,将形成水分、氯离子及二氧化碳快速侵入的通道,显著加速钢筋电化学腐蚀与混凝土碳化进程。实验数据表明,在氯盐环境中,裂缝宽度超过0.3mm时,钢筋锈蚀速率将提高3~5倍,严重损害结构耐久性能,甚至危及整体稳定性与安全储备。

在使用功能层面,裂缝不仅影响视觉美观,更易引发使用者心理顾虑。对蓄水结构如水池、水箱等,裂缝宽度超过0.1mm即可导致明显渗漏,影响正常使用功能;在寒冷地区,侵入水分引发的冻融循环会进一步导致混凝土表面剥落与性能劣化。

在经济性层面,裂缝修补与加固成本高昂,后期维护费用

可达初始造价的2~3倍,同时显著缩短建筑服役寿命,带来长期维护负担与社会资源浪费^[1]。因此,建立全过程、多层次的裂缝防控体系,是保障混凝土结构安全可靠与长效服役的关键所在。

2 典型裂缝类型的发生机理与防控措施

2.1 塑态收缩裂缝

发生阶段与形成机理:

塑态收缩发生在混凝土浇筑后的1~4小时内,此时混凝土仍处于塑性状态。其形成机理主要涉及表面水分蒸发与毛细管压力作用:当表面水分蒸发速率大于内部泌水速率时,毛细孔中形成弯液面,产生高达1~3MPa的毛细管负压。这种负压使混凝土颗粒相互靠拢,导致体积收缩。

形态特征与识别要点:

裂缝呈不规则网状分布, 间距5-50cm不等, 深度一般不超过20mm, 表面宽度通常为0.1-0.5mm。这种裂缝在混凝土初凝前最为活跃, 若不及时处理, 可能成为后期其他类型裂缝发展的起点。

综合防控措施:

(1) 环境控制: 采取遮阳挡风措施, 必要时建立临时围挡并喷雾增湿, 将环境相对湿度提升至70%以上; (2) 工艺优化: 在混凝土初凝前实施二次抹面, 有效闭合表面微裂纹。对于大面积板类结构, 应采用机械抹光机进行专业处理; (3) 养护保障: 终凝后立即采用聚乙烯薄膜或湿麻布全覆盖养护, 保持表面持续湿润不少于7-14天。

2.2 沉降收缩裂缝

发生阶段与形成机理:

沉降收缩主要发生在浇筑后0.5-3小时, 此时混凝土仍处于塑性状态但开始失去流动性。其形成机理涉及多物理场耦合作用: 在重力作用下, 固体颗粒沉降速率约为5-15mm/h, 而水分与空气以相近速率上浮^[2]。当沉降过程受到钢筋、预埋件或模板阻碍时, 会在障碍物上方形成应力集中区域, 产生拉应力可达0.5-1.2MPa, 超过混凝土早期抗拉强度(通常为0.1-0.3MPa)时即产生裂缝。

形态特征与识别要点:

裂缝主要沿钢筋或埋件方向分布, 宽度一般为0.2-1.0mm, 深度可达钢筋表面, 具有明显的方向性与规律性。在梁板交接处、柱脚等钢筋密集区域尤为常见。

综合防控措施:

(1) 配合比优化: 将坍落度控制在120-160mm范围内, 通过添加减水剂与增粘剂平衡工作性与稳定性, 掺加20%-30%粉煤灰显著改善混凝土粘聚性; (2) 浇筑控制: 分层浇筑, 每层厚度不超过400mm, 层间间隔时间控制在1-2小时内, 确保下层混凝土完成初步沉降; 分段分区振捣, 避免过振与漏振。(3) 模板与钢筋控制: 保护层厚度偏差不得超过规范允许值, 模板支撑系统刚度需验算确保沉降量小于 $L/500$ (L 为跨度)。

2.3 干燥收缩裂缝

发生阶段与形成机理:

干燥收缩发生在混凝土硬化后的数月乃至数年内, 是一个长期而持续的过程。其机理涉及毛细孔张力与表面吸附水膜变化: 当环境相对湿度低于90%时, 毛细孔中的水分开始蒸发, 产生毛细张力; 同时, C-S-H凝胶层间吸附水膜变薄, 范德华引力增大, 导致凝胶体被压缩。这两种效应共同作用, 使混凝土产生体积收缩。

形态特征与识别要点:

初期表现为表面不规则裂缝, 宽度0.05-0.3mm, 随后可能发展为贯穿性裂缝。在板、墙等受限构件中常呈现等间距分布, 间距一般为构件高度的1-2倍。

综合防控措施:

(1) 配合比设计: 水胶比不宜超0.50, 单位用水量不超过

180kg/m³。用水量每增加10kg/m³, 干燥收缩值约增加50-80×10⁻⁶;

(2) 材料选择: 选用级配良好、连续粒级、弹性模量高的致密骨料, 砂率宜控制在38%-42%; (3) 外加剂应用: 掺加粉煤灰或矿粉, 使用膨胀剂补偿收缩; (4) 构造措施: 配置直径6-10mm、间距100-150mm的分布钢筋, 设置间距20-30mm的后浇带, 在混凝土浇筑后40-60天封闭; (5) 养护管理: 保证湿养护时间不少于14天, 对于大体积结构应延长至28天, 养护期间表面湿度保持90%以上。

2.4 碳化收缩裂缝

发生阶段与形成机理:

碳化收缩发生在混凝土长期暴露于含二氧化碳环境的过程中。化学反应机理: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 。该反应导致固相体积减少, 引发收缩裂缝。

形态特征与识别要点:

碳化收缩本身不产生特定裂缝形态, 但与干燥收缩耦合后显著加剧表面裂缝的宽度与深度。碳化深度随时间呈抛物线增长, 从表面向内发展。

综合防控措施:

(1) 密实度提升: 通过掺加适量的硅灰或矿粉, 降低混凝土的透气性, 以延缓CO₂扩散速率; (2) 表面强化: 在初凝前实施2-3次抹面, 形成0.5-1.0mm厚的致密表层; (3) 防护涂层: 涂刷渗透型防水剂、成膜型涂料, 形成连续防护层或表面粘贴饰面砖等。(4) 环境控制: 做好场所通风, 控制CO₂的浓度。

2.5 凝结收缩裂缝

发生阶段与形成机理:

凝结收缩发生在水泥凝结硬化初期(24小时内), 属于化学减缩过程。其本质是水泥水化反应后, C₃S和C₂S水化生成C-S-H凝胶时固相体积减小, 以及C₃A与石膏反应形成钙矾石时的局部体积变化。

形态特征与识别要点:

在自由状态下表现为均匀体积减小, 但当受到基础、模板或钢筋约束时, 会产生早期拉应力, 诱发与约束方向垂直的平行裂缝, 深度通常贯穿整个受限区域。

综合防控措施:

(1) 水泥选择: 优先选用C₃A含量低于6%、C₃S含量45%-55%的中热水泥, 比表面积控制在350-380m²/kg; (2) 掺合料应用: 掺加适量粉煤灰、矿粉, 降低早期水化热, 延缓温升峰值出现时间。

2.6 大体积混凝土温度裂缝

形成机理:

大体积混凝土温度裂缝主要由水泥水化热引起的温度梯度导致。

综合防控措施:

(1) 材料选择: 采用低热水泥, 配合缓凝剂减水剂, 延缓温升峰值出现至浇筑后3-5天; (2) 温度控制: 通过冷却粗骨料、使用冰水拌合等方式, 以降低出机温度, 将混凝土出机温度控制在

30℃以内,每日的温升值控制在40-50℃以内、内部最高温度宜控制在70℃以内,里表温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$,表气温差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$;每日降温速率 $\leq 2.0^{\circ}\text{C}$; (3)冷却系统:预埋冷却水管,间距1.0-1.5m,通水冷却10-14天,控制混凝土内部温度; (4)构造设计:设置间距30-40m的后浇带,宜在45-60天后采用微膨胀混凝土封闭; (5)养护保障:覆盖双层塑料薄膜加保温层的复合养护系统,养护14-28天。

3 配合比设计、原材料对裂缝控制的影响与选材策略

3.1 水胶比与水量的影响

影响机理:水胶比是混凝土强度和收缩的关键参数。过高的水胶比和单位用水量会导致:

(1)强度降低:混凝土内部孔隙率增加,结构薄弱点增多,抗拉强度不足,难以抵抗收缩等引起的拉应力。(2)收缩增大:多余水分的蒸发会在混凝土内部留下毛细孔,并引起显著的干燥收缩。这是塑性收缩和干缩裂缝的主要诱因。(3)泌水和沉降:高水灰比易导致骨料下沉、水泥浆上浮,在钢筋上方形成沉降裂缝。

混凝土的配合比设计不仅是决定其强度、耐久性和工作性的核心环节,更是控制其开裂风险的“源头性”手段。一个科学合理的配合比,能够从本质上优化混凝土的物理力学性能和体积稳定性,从而在材料层面为裂缝控制奠定坚实基础。

3.2 水泥用量与品种的影响及选用

影响机理:

(1)用量:水泥用量过高,意味着水化热增高,导致大体积混凝土内外温差过大,易产生温度裂缝。同时,水泥浆体含量增加,也意味着收缩量增大。(2)品种:不同品种的水泥其水化热、早期强度发展速率不同。例如,早强型硅酸盐水泥水化热高、放热快,比中热或低热水泥更易引发温度裂缝。(3)细度:水泥颗粒越细,与水起反应的表面积愈大,水化作用的发展就越迅速,凝结硬化的速度越快,高细度的水泥会导致水化热集中、化学收缩增大、需水量增加,从而增大开裂风险。有研究显示比表面积从 $350\text{m}^2/\text{kg}$ 增至 $400\text{m}^2/\text{kg}$ 时,1天水化热增加15%-20%,3天干燥收缩增加10%-15%,早期开裂风险明显提高。

水泥作为混凝土的胶凝材料,其性能直接影响开裂敏感性。在满足强度发展要求的前提下,水泥的比表面积应控制在 $380\text{m}^2/\text{kg}$ 以内^[3]。近年来商家为追逐利润,水泥有越磨越细的趋势,是影响裂缝一个不容忽视的因素。

3.3 骨料对裂缝控制的影响与质量控制

影响机理:

(1)级配:良好的级配是指,粗颗粒的空隙恰好由中颗粒填充,中颗粒的空隙恰好由细颗粒填充,如此逐级填充,使集料形

成最密致的堆积状态,空隙率达到最小值,堆积密度达最大值,优良的级配能形成紧密的骨架,有效抑制水泥浆体的收缩,从而达到节约水泥,提高耐久性,减少裂缝的目标。不良的级配则导致骨料间隙率大,需要更多的水泥浆来填充,从而增加收缩和热源。(2)粒径与种类:采用最大粒径较大的坚硬骨料,可以降低单位用水量,并对水泥浆体的收缩产生更大的约束作用。而使用弹性模量较低(如轻骨料)或具有碱活性的骨料,则会增加开裂风险。(3)降低骨料的含泥量与泥块含量含泥量(粒径 $< 75\mu\text{m}$ 颗粒)与泥块含量对混凝土性能产生多重负面影响:可使界面过渡区劣化、用水量增加、收缩变形加剧、耐久性降低、碱-集料反应风险。

选用良好级配的骨料,在不影响施工的情况下,尽量增大粗骨料的粒径,减少空隙率。选用中粗砂,降低砂率,现场多采用连续级配的5-25mm粗骨料与细度模数2.6-2.9的中砂组合,可实现空隙率最小化(通常 $\leq 38\%$),从而减少水泥浆体需求约15%-20%,显著降低收缩值及因温差引发的温度裂缝。

严格执行《建设用砂》(GB/T14684-2022)与《建设用卵石、碎石》(GB/T14685-2022)标。当指标超限时,应采用轮式洗砂机或螺旋洗石机进行清洗处理,直至指标合格。这是提高混凝土体积稳定性、减少裂缝发生的最经济且有效的技术措施之一。

化学外加剂(减水剂、缓凝剂、膨胀剂)及掺合料(粉煤灰、硅灰、矿粉、火山灰等优质矿物掺合料)的合理选用,也可有效降低水化热、改善微观结构、减少收缩。

4 结束语

混凝土裂缝控制是一项融合材料科学、结构力学与施工管理的系统工程。通过深入解析各类裂缝的形成机理与发展规律,充分认识材料、配合比、工艺、养护、含泥量与泥块含量对混凝土界面结构与耐久性的不利影响,建立从材料优选、配合比设计、施工工艺到长期维护的全过程防控体系,是实现混凝土结构耐久安全的重要保障。未来,随着高性能材料、智能监测技术与数字孪生模型的发展,混凝土裂缝控制将朝着精准预测、实时反馈与主动干预的方向演进,为建筑业的绿色化、智能化转型提供关键技术支撑。坚持“预防为主、防控结合”的原则,采取全生命周期的质量控制策略,才能从根本上解决混凝土裂缝这一行业难题,推动我国混凝土工程技术水平的持续提升。

[参考文献]

- [1]文升宁.大型混凝土浇筑裂缝的防治策略与工程实践研究[J].散装水泥,2025(4):115-117.
- [2]郝涵涵.混凝土裂缝产生原因分析及无损检测技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(3):053-056.
- [3]邓仰建.基于钢筋混凝土结构裂缝的形成机理与控制方法[J].中国建筑金属结构,2025,24(9):181-183.