

钢筋混凝土结构裂缝成因与施工防控对策分析

洪丽娟 李 波

湖北沛函建工集团有限公司 湖北 宜昌 443000

摘 要：裂缝是钢筋混凝土结构最常见的质量通病，不仅影响结构外观和耐久性能，严重时更威胁结构安全。本文从材料特性、设计构造、施工工艺和环境条件等多维视角，系统分析了钢筋混凝土结构裂缝的主要成因，重点揭示了施工环节中混凝土配合比控制失当、浇筑振捣不规范、养护措施不到位、过早加载与拆模不当等关键致裂因素。在此基础上，提出涵盖材料优选、配合比优化、施工过程精细管控和温度应力疏导等方面的全流程防控对策。研究认为，施工阶段是裂缝防控最直接、最有效的窗口期，将裂缝治理从“事后修补”转向“过程预防”，是提升钢筋混凝土结构质量的根本路径。

关键词：钢筋混凝土结构；裂缝成因；收缩裂缝；温度裂缝；施工防控

引言

钢筋混凝土结构凭借优异的承载、耐久及可塑性，成为现代建筑的主流形式。然而，裂缝在结构全生命周期中普遍存在，不仅破坏整体性与美观，更成为水、氯离子等有害介质侵入通道，加速钢筋锈蚀与混凝土碳化，严重缩短使用寿命。若裂缝宽度过大或贯穿受力截面，还将直接削弱承载力，引发安全事故。值得注意的是，相当比例的早期裂缝并非源于设计或材料缺陷，而是由施工期工艺控制不严、养护不当或操作不规范导致，即“施工出来的”裂缝。这意味着通过精细化施工管理，许多裂缝本可避免。但受工期紧张、现场复杂及人员技能差异等因素制约，施工环节的裂缝防控长期未获足够重视。因此，强化施工过程管控，提升精细化管理水平，对于保障结构安全、延长服役寿命具有重要意义。

1 钢筋混凝土结构裂缝的分类与成因谱系

1.1 按裂缝形态与成因的基本分类

钢筋混凝土结构裂缝可按多种维度进行分类。按方向分为水平裂缝、垂直裂缝、斜裂缝和网状裂缝；按深度分为表面裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝；按时间分为施工期裂缝和运营期裂缝。但从成因分析的角度，最具有指导意义的分类是将裂缝分为荷载裂缝和非荷载裂缝两大类^[1]。荷载裂缝是由外部荷载作用引起的，包括设计荷载下的弯曲裂缝、剪切裂缝和扭转裂缝，以及意外超载导致的受力裂缝，这类裂缝通常与结构应力状态直接相关。非荷载裂缝则主要由材料自身性能变化、温度变形、收缩变形和化学反应等引起，其产生不依赖外部荷载作用，是施工阶段裂缝防控的重点对象。

1.2 非荷载裂缝的主要类型与机理

非荷载裂缝的成因复杂多样，其中最常见的类型包括：塑性收缩裂缝，发生在混凝土浇筑后的塑性阶段，当表面水分蒸发速率超过泌水上升速率时，表层混凝土产生拉应力而开裂，通常呈不规则的网状或平行状分布；干燥收缩裂缝，在硬化混凝土失水干缩过程中产生，受约束时内部拉应力积聚，最终沿骨料界面或薄弱面释放；温度裂缝，由水泥水化热引起内部温升与表面散热之间的温差应力所致，在大体积混凝土中尤为突出；自收缩裂缝，在水胶比较低的高性能混凝土中，因内部相对湿度下降导致毛细管压力增大而产生；此外还有碳化收缩裂缝、碱-骨料反应裂缝以及钢筋锈胀裂缝等化学和电化学反应诱发的裂缝。

1.3 施工致裂因素在裂缝成因中的权重

在诸多裂缝成因中，施工因素占据不可忽视的比重。施工期出现的裂缝中约 70%~80% 可归因于施工工艺控制不当或现场管理疏漏。这些施工因素有的直接单独致裂（如养护缺水导致干缩开裂），有的则与材料特性或设计构造因素叠加放大（如炎热季节施工配合比未作调整，同时养护不到位，两者共同加剧开裂风险）。从控制的可行性和经济性来看，施工因素恰恰是裂缝防控中最具操作空间和成本效益的环节——它们不涉及结构方案的颠覆性变更，也不依赖高昂的技术投入，而主要依赖管理意识的提升和工艺标准的严格执行。因此，施工阶段应被定位为裂缝防控的首要战场。

2 施工阶段裂缝成因的深度剖析

2.1 混凝土配制与拌和环节的致裂因素

施工现场常见的配合比问题包括：水泥用量过大或强度等级过高，导致水化热显著增加和收缩量增大；水胶比控制不严，过高的水胶比虽然改善了施工和易性，但大幅增加了干燥收缩和塑性收缩的风险；骨料级配不良或含泥量超标，削弱了混凝土的体积稳定性，增大了收缩变形。此外，外加剂的选用和掺量也直接影响裂缝倾向——缓凝剂过量可能延迟水化过程，使混凝土长期处于塑性状态而易受气候影响；减水剂品种与水泥适应性不良时，可能导致异常凝结或泌水严重，破坏混凝土的均匀性。

2.2 浇筑与振捣环节的操作性缺陷

混凝土浇筑过程中的分层厚度过大或浇筑速度过快，使下层混凝土在尚未初凝时被上层覆盖，不利于水化热的逐步释放，加剧了温度应力积累。更为常见的是振捣操作不规范——欠振导致混凝土不密实，存在蜂窝空洞，成为应力集中和裂缝萌生的薄弱点；过振则引起骨料下沉、浆体上浮，表层形成富浆层，该层水胶比高、收缩大，极易产生表面网状裂缝^[2]。在泵送混凝土施工中，有时为便于泵送而随意向混凝土中加水，严重改变了原设计配合比，大幅增加了收缩开裂的风险。对于大面积现浇板类结构，施工缝留设位置不当或接茬处理粗糙，也在新旧混凝土界面形成天然裂缝面。

2.3 养护环节的严重缺位

混凝土浇筑后的早期（特别是初凝至终凝后的7天内）是其体积稳定性最脆弱、收缩应力发展最剧烈的时期，同时也是水化反应进行最快、对水分需求最迫切的阶段。现场常见的养护缺陷包括：养护起始时间过晚，表面水分已大量散失，塑性收缩裂缝业已形成；养护方式不当，仅靠洒水而不覆盖保湿，水分蒸发仍快于补充；养护周期不足，在混凝土内部温升尚未充分释放、强度尚未达到抗裂能力时就停止养护。在炎热、干燥或多风气候条件下，养护缺陷导致的早期裂缝问题更加严重，往往在浇筑后数小时内即出现肉眼可见的微细裂缝。

2.4 拆模与加载环节的时机把控失当

拆模过早时，混凝土强度尚未达到设计要求的拆模强度，构件自重和可能的施工荷载超过其承载能力，导致受弯裂缝或受剪裂缝的产生。特别是悬挑构件和跨度较大的梁板，过早拆模的危害更为明显。同样，在混凝土强度未达到设计要求时即堆放建筑材料、停放施工机械，或在楼板上进行集中荷载作业，也可能在构件中产生不可恢复的裂缝。这一问题的复杂性在于，施工现场往往面临工期压力，拆模时间和后续工序安排存在压缩

冲动，质量与进度之间的平衡经常向后者倾斜。

2.5 环境条件与季节性施工的附加风险

夏季高温施工时，材料温度高、水化反应加速，混凝土内部温升更高、温度梯度更大，同时表面水分蒸发迅速，开裂风险倍增。冬季低温施工时，若保温措施不到位，混凝土可能遭受早期冻害，水化反应迟滞甚至停止，解冻后强度损失和微裂缝贯通不可避免。大风天气下，即使环境温度不高，强对流也会加速表面水分蒸发，形成“风裂”。雨期施工则因雨水冲刷改变表层水胶比，造成表层强度降低和塑性裂纹。这些环境风险并非不可控，但要求施工方案必须根据气候条件做出针对性调整，而实际施工中这种动态调整往往缺失或流于形式。

3 裂缝防控的施工对策体系

3.1 材料优选与配合比优化控制

裂缝防控应从材料源头着手。在满足设计强度和耐久性要求的前提下，优先选用低水化热的水泥品种（如矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥），或掺入适量粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料替代部分水泥，以降低水化热总量并改善混凝土的体积稳定性。严格控制骨料的含泥量和级配，确保其体积稳定性良好。配合比设计应在满足泵送和施工要求的条件下，尽可能降低水胶比和单方用水量，同时通过掺加减水剂改善和易性而非单纯加水。对于大体积混凝土，尚需进行绝热温升和温度应力验算，据此确定水泥用量和入模温度的合理控制范围。

3.2 浇筑工艺的精细化管控

规范浇筑作业是裂缝防控的关键工序。混凝土浇筑应分层进行，每层厚度控制在300~500毫米之间，确保下层混凝土在初凝前完成上层覆盖，同时使水化热逐步释放。浇筑速度应均匀连续，避免间歇过久造成冷缝。振捣作业应严格遵守操作规程——插入式振捣器的移动间距不超过有效作用半径的1.5倍，与模板保持适当距离，振捣时间以混凝土表面不再明显下沉、不再冒气泡且泛出浆液为准，杜绝欠振和过振^[3]。严禁在泵送过程中向混凝土任意加水，如因运输或泵送造成坍落度损失过大，应由试验人员在试验确定的基础上添加适量高效减水剂进行调整。

3.3 养护制度的科学建立与严格执行

养护是裂缝防控最具成本效益的措施，必须建立科学的养护制度并坚决执行。养护应从混凝土初凝后立即开始，优先采用覆盖湿麻袋或土工布并定时洒水的方法，保持混凝土表面持续湿润。对于现浇板类构件，浇筑收面后应及时覆盖塑料薄膜，形成封闭的保湿层，有

效抑制表面水分蒸发。养护时间应充足——普通混凝土不少于 7 天,对掺有缓凝剂或矿物掺合料的混凝土及有抗渗要求的混凝土,应延长至 14 天以上。大体积混凝土在养护期间还应进行温度监测,控制内部最高温度不超过 75℃,内外温差不超过 25℃,当温差超限时应通过覆盖保温层或循环水冷却管等措施进行人工干预。

3.4 合理拆模时间与施工荷载控制

拆模时间的确定应以混凝土同条件养护试块的实测强度为依据,严禁凭经验或工期需求提前拆模。侧模须在混凝土强度能保证构件棱角完好且不因拆模受损时方可拆除,承重底模的拆模强度按构件跨度和结构类型分别执行规范规定的百分比要求(一般跨度构件不低于 75%,大跨度及悬臂构件须达到 100%)。拆模后如需在构件上堆放材料或进行后续施工,应核算施工荷载效应,确认其不超过构件的承载能力^[4]。材料堆放应分散布置,避免集中堆载造成局部超载。施工电梯、布料杆等大型设备如需在楼板上运行,应编制专项支撑加固方案。

3.5 季节性施工的专项裂缝防控措施

针对不同季节的气候特征,应制定专项施工方案并严格执行。夏季高温施工时,应对砂石料进行遮阳降温,必要时用冷水拌和或加冰屑以降低混凝土出机温度和入模温度,尽量选择在清晨或傍晚气温较低的时段浇筑。浇筑后及时覆盖保温保湿,必要时搭设遮阳棚防止阳光直射。冬季施工时,应掺加防冻剂及早强剂,并采取覆盖保温材料、搭设暖棚等保温措施,确保混凝土在达到临界强度前不受冻害。大风天气下,浇筑作业面应设置挡风设施,并加快覆盖保湿的节奏。雨期施工应备足防雨材料,遇降雨及时覆盖新浇混凝土并防止雨水冲刷。

3.6 信息化监测与裂缝预警

对于重要结构或大体积混凝土工程,宜引入信息化监测手段辅助裂缝防控。在关键部位埋设温度传感器和应变传感器,对混凝土内部温度、应变进行实时监测,数据上传至管理平台进行分析处理。当监测值接近控制指标时自动预警,提醒管理人员及时采取调整养护措施或减缓浇筑速度等干预行为。监测数据同时留存为工程档案,为后期裂缝调查和质量追溯提供依据。

4 裂缝防控的管理支撑与制度保障

应建立裂缝防控的责任体系,明确建设单位、施工单位、监理单位和检测机构在裂缝防控中的具体职责。将混凝土裂缝控制指标纳入施工质量验收标准,设定明确的允许裂缝宽度限值(室内正常环境一般为 0.3 毫米,室外及潮湿环境为 0.2 毫米),对超过限值的裂缝严格按照程序处理并追查成因。建立裂缝发现、报告、分析、处理的闭环流程——任何人员发现明显裂缝后应立即报告技术负责人,由后者组织判定裂缝性质,确定处理方案并监督实施,所有过程记录存档备查。将裂缝控制绩效纳入施工班组考核体系,对因工艺违规导致严重裂缝的责任人予以追责,对裂缝控制良好的作业组给予奖励。通过制度的刚性约束,将裂缝防控从“软要求”转化为“硬指标”。

5 结语

钢筋混凝土结构裂缝成因复杂,涉及材料、设计、施工及环境多因素。在施工期,施工工艺控制与管理水平是决定性变量,也是最具改进潜力的环节。本文从全流程出发,系统剖析各环节致裂因素,提出涵盖材料选择、配合比设计、浇筑振捣、养护管理及拆模加载的整套防控对策。核心结论表明,施工裂缝防控效果不取决于单项“高招”,而在于每道工序的精细度与标准执行力度,即“养护到位则收缩小,振捣规范则缺陷少,拆模适时则损伤无”。将防控重心从事后修补前移至过程管理,以施工精细化抵消环境与材料变异性的不利影响,是提升结构质量的有效路径。未来研究应聚焦新型抗裂材料(如纤维混凝土)、智能化养护技术及基于大数据的裂缝风险预警系统,为施工裂缝防控提供更先进的技术支撑。

参考文献

- [1] 赵国藩,黄承逵,徐世烺.混凝土裂缝理论与控制技术研究进展[J].建筑结构学报,2023,44(2):1-14.
- [2] 王铁梦,杨嗣信,韩素芳.工程结构裂缝控制与施工技术[J].混凝土,2024(3):1-8.
- [3] 钱春香,蔡瑞,陈春.现代混凝土收缩开裂机理与调控方法[J].硅酸盐学报,2025,53(1):112-121.
- [4] 孙伟,张云升,刘加平.高强混凝土早期收缩特性与抗裂评价[J].建筑材料学报,2023,26(6):891-899.