

超长结构裂缝成因及抗裂技术应用

陈宗洪 曹兵兵

中咨工程管理咨询有限公司 北京 100021

摘要：随着建筑工程向大跨度、超长化发展，超长结构裂缝问题日益突出，严重影响结构安全与使用寿命，成为工程领域亟待解决的难题。本文针对超长结构易出现裂缝的问题，系统分析裂缝类型、成因及危害，重点研究抗裂关键技术与新型技术应用。首先分类阐述温度、收缩、荷载、地基沉降四类裂缝及安全、耐久性、功能层面危害；再从材料、设计、施工、环境维度剖析成因；随后介绍材料优化、结构构造、施工控制三类关键抗裂技术，以及新型抗裂材料、结构体系、新型施工工艺抗裂技术的实际应用。

关键词：超长结构；裂缝成因；抗裂关键技术；应用

引言：当前对超长结构裂缝的研究虽有一定基础，但在技术协同应用与新型技术落地方面仍需深化。本文围绕超长结构裂缝展开研究，先明确裂缝类型与危害，再深入分析成因，进而系统梳理传统抗裂关键技术与新型抗裂技术的应用要点，旨在构建完善的裂缝防控体系，为超长结构工程的抗裂设计与施工提供科学指导，推动行业抗裂技术发展。

1 超长结构裂缝类型及危害

1.1 超长结构裂缝类型

超长结构裂缝按成因可分为以下类型。（1）温度裂缝由结构内外温差引发，混凝土热胀冷缩产生温度应力，超过抗拉强度即形成裂缝，呈不规则分布且随温度变化开合。（2）收缩裂缝源于混凝土硬化体积收缩（干燥、自收缩、塑性收缩），受约束无法变形产生拉应力引发，裂缝细小但可能贯通截面。（3）荷载裂缝因外部荷载超设计承载力，结构应力集中超抗拉极限形成，形态与荷载方向相关，呈弯曲、剪切等特征。（4）地基不均匀沉降裂缝由地基沉降差异产生附加应力，使结构拉伸或剪切变形形成，多沿薄弱部位分布，呈斜向或竖向。

1.2 超长结构裂缝危害

超长结构裂缝会造成多方面危害。（1）安全上，削弱混凝土有效受力面积，降低承载能力，导致变形增大、刚度降低，严重时引发结构失稳。（2）耐久性上，破坏混凝土密实性，加速水分、腐蚀性介质侵入，加剧钢筋锈蚀与混凝土碳化，缩短结构寿命。（3）功能上，破坏防水、隔音功能，导致雨水渗入，振动传递增强，干扰正常使用^[1]。

2 超长结构裂缝成因

2.1 材料因素

水泥方面，若选用水化热较高的品种，在硬化过程

中会释放大量热量，导致混凝土内部温度急剧升高，与外部形成较大温差，进而产生温度应力引发裂缝；同时，水泥细度超标或矿物组成不合理，也会加剧混凝土的收缩变形。骨料若级配不连续、粒径偏小，会增加混凝土的比表面积，导致需水量上升，干燥收缩增大；而骨料含泥量过高，会削弱骨料与水泥石的粘结强度，降低混凝土抗拉性能。外加剂若掺量不当，如减水剂过量可能导致混凝土离析、收缩增大，膨胀剂掺量不足则无法有效补偿混凝土收缩，均易诱发裂缝。

2.2 设计因素

结构形式上，若平面布置不规则、刚度突变，易在薄弱部位形成应力集中；竖向构件与水平构件连接不当，会限制结构变形，增加附加应力。配筋设计中，若配筋率过低，混凝土抗拉能力不足；钢筋布置间距过大或位置偏差，会导致局部混凝土受力不均，无法有效抵抗收缩和温度应力。温度应力计算若忽略环境温差、水化热影响，未采取合理的温度控制措施，会使结构设计无法应对实际温度变形，最终引发裂缝。

2.3 施工因素

混凝土浇筑时，若浇筑速度过快、分层厚度过大，会导致下层混凝土初凝后上层继续浇筑，形成施工冷缝；振捣不密实则会使混凝土内部存在孔隙，降低密实度和抗拉强度。养护环节若养护不及时、养护时间不足，或仅表面洒水未保证内部湿度，会导致混凝土水分快速散失，干燥收缩加剧。施工缝设置若位置不当、处理不彻底，如未清除浮浆、未进行界面粘结处理，会破坏结构整体性，成为裂缝萌发的薄弱点。

2.4 环境因素

温度变化方面，昼夜温差、季节温差会使结构反复经历热胀冷缩，长期循环作用下，混凝土内部累积的温

度应力超过抗拉极限,便会产生裂缝。湿度变化时,若环境湿度频繁波动,混凝土会经历干湿循环,导致体积反复收缩与膨胀,加速裂缝扩展。地基不均匀沉降会使结构各部位产生差异变形,当变形受到约束时,结构内部产生附加拉应力和剪应力,若应力超过混凝土承载能力,就会在沉降差异较大的部位出现裂缝^[2]。

3 超长结构抗裂关键技术

3.1 材料优化与配比控制技术

材料选择与配比设计是超长结构抗裂的基础,要通过精准控制材料性能与配比参数,从源头降低裂缝风险。(1)低收缩、低水化热材料选用。优先选用低热矿渣水泥、粉煤灰水泥等低水化热水泥品种,减少水泥水化过程中释放的热量,降低混凝土内部温度升高幅度,缩小内外温差。选用线膨胀系数较小的骨料,如石灰岩骨料,减少温度变化引发的体积变形;骨料需控制含泥量,一般要求含泥量不超过1%,避免因骨料与水泥石粘结力下降导致抗拉性能减弱。(2)混凝土配合比优化。调整胶凝材料用量,在满足强度要求的前提下,适当降低水泥用量,增加粉煤灰、矿粉等矿物掺合料比例,掺量可控制在30%-50%,利用矿物掺合料的火山灰效应和微集料效应,改善混凝土内部结构,降低收缩变形。控制水胶比,一般不大于0.45,减少混凝土内部孔隙率,提高密实度;同时优化砂率,中砂砂率通常控制在35%-40%,保证混凝土和易性的同时,减少砂浆收缩对整体结构的影响。(3)功能性外加剂精准掺加。掺加高效减水剂,减水率控制在25%-35%,在降低水胶比的同时,保证混凝土流动性,减少施工振捣难度;掺加膨胀剂,根据结构需求选择硫铝酸盐型、氧化钙型等类型,掺量一般为胶凝材料总量的6%-12%,通过膨胀剂水化生成膨胀性产物,补偿混凝土干燥收缩和自收缩。掺加一定量的聚丙烯纤维,聚丙烯纤维含量为100%,直径大于20 μm ;抗拉强度大于500MPa,弹性模量大于4800MPa,掺量应综合技术与经济情况选用并达到较好的抗裂性能。

3.2 结构构造抗裂技术

通过合理的结构构造设计,优化应力分布,增强结构抗裂能力,减少裂缝产生的可能性。(1)后浇带与加强带设置。后浇带间距一般控制在30-40m,宽度为800-1000mm,在混凝土浇筑完成后28-60d进行封闭,释放结构早期收缩应力;膨胀加强带采用补偿收缩混凝土,强度等级比相邻混凝土高一个等级,带宽为2000-3000mm,可替代部分后浇带,实现连续浇筑,通过混凝土膨胀抵消收缩应力。(2)配筋优化设计。增加构造配筋率,在楼板、墙板等构件中,构造钢筋配筋率不低于0.15%,且

钢筋间距不大于200mm,增强混凝土抗拉性能;在应力集中部位,如梁柱节点、墙板转角处,设置附加钢筋,附加钢筋长度延伸至应力影响区外500mm以上,改善局部应力分布,避免应力集中引发裂缝。(3)结构刚度协调设计。控制构件刚度差异,避免因刚度突变导致应力集中,如在墙板与楼板连接部位,通过调整构件截面尺寸,使刚度渐变;对于超长框架结构,适当增加梁的线刚度,减少柱的荷载负担,平衡结构内力分布,降低结构整体开裂风险。

3.3 施工过程控制技术

施工环节的精准控制是保障超长结构抗裂效果的关键,需严格规范施工操作,减少施工因素引发的裂缝。

(1)混凝土浇筑工艺控制。采用分层浇筑方式,分层厚度根据振捣设备确定,一般不大于500mm,且上层混凝土浇筑需在下层混凝土初凝前完成,避免形成施工冷缝;对于大体积超长结构,采用跳仓浇筑法,将结构划分为若干仓块,仓块面积控制在200-300 m^2 ,间隔7-10d浇筑相邻仓块,释放部分收缩应力。(2)振捣与抹面操作规范。使用插入式振捣器,振捣点间距控制在300-400mm,振捣时间以混凝土表面出现浮浆、不再下沉为宜,避免过振导致骨料离析或欠振造成密实度不足;混凝土浇筑完成后,及时进行抹面处理,初凝前进行第一次抹面,终凝前进行第二次抹面,消除表面收缩裂缝,同时控制抹面压力,避免过度压实导致内部结构破坏。(3)养护制度执行。混凝土浇筑完成后12h内覆盖保湿材料,如土工布、麻袋等,保持表面湿润;采用洒水养护时,养护周期不少于14d,每天洒水次数根据环境温度调整,确保混凝土表面温度与内部温度差不超过25 $^{\circ}\text{C}$;对于大体积混凝土,可采用覆盖保温被或布设冷却水管的方式,控制降温速率,降温速率不大于2 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$,减少温度应力引发的裂缝^[3]。

4 超长结构中新型抗裂技术应用

4.1 新型抗裂材料技术的应用

新型抗裂材料通过改良成分与性能,为超长结构裂缝控制提供更高效的解决方案,其应用呈现功能化、复合化特征。(1)自修复混凝土技术。目前应用的自修复混凝土主要包括微生物自修复、胶囊自修复两类。微生物自修复混凝土在胶凝材料中掺入休眠状态的微生物孢子与营养剂,当混凝土产生裂缝时,水分与空气进入裂缝触发微生物激活,微生物代谢产生碳酸钙等物质填充裂缝;胶囊自修复混凝土将修复剂封装于聚合物胶囊中,裂缝扩展过程中胶囊破裂释放修复剂,修复剂与混凝土组分发生化学反应实现裂缝愈合。(2)低收缩高

韧性混凝土技术。这类混凝土通过调整组分设计,如掺入纳米级矿物掺合料、新型高分子聚合物,降低混凝土干燥收缩与自收缩率,同时提高混凝土抗拉韧性。当前应用中,低收缩高韧性混凝土的收缩率可控制在 $200\mu\epsilon$ 以下,抗拉强度较普通混凝土提升30%以上,能有效减少超长结构因收缩变形引发的裂缝。(3)智能响应型抗裂材料技术。智能响应型材料可根据环境变化自动调整性能,目前应用的包括温度敏感性膨胀材料、应力感应型纤维材料。温度敏感性膨胀材料在特定温度区间内产生定向膨胀,补偿混凝土因温度降低产生的收缩;应力感应型纤维材料在结构应力达到阈值时,通过自身形变或性能变化预警裂缝风险,为后续裂缝防控提供依据。

4.2 新型结构体系抗裂技术的应用

新型结构体系通过优化结构形式与受力模式,从根本上减少超长结构的应力集中与变形约束,其应用注重轻量化、模块化。(1)装配整体式超长结构体系。该体系采用预制构件工厂化生产,现场通过灌浆套筒、后浇混凝土等方式连接形成整体结构。在抗裂设计中,预制构件之间设置柔性连接节点,允许一定程度的相对变形,减少温度与收缩应力的传递;预制构件在工厂养护成型,收缩变形提前完成,现场拼装后结构整体收缩量显著降低,减少裂缝产生概率。(2)钢-混凝土组合抗裂结构体系。这类体系通过钢构件与混凝土构件的协同工作,发挥钢材抗拉强度高、混凝土抗压性能好的优势,减少结构整体开裂风险。常见形式包括钢骨混凝土结构、钢管混凝土结构,钢构件可作为结构的“抗裂骨架”,承担混凝土收缩与温度变化产生的拉应力。当前应用中,通过采用界面处理技术优化钢与混凝土的界面粘结性能,提高粘结强度,避免界面剥离引发裂缝。

(3)模块化预应力抗裂体系。该体系将结构划分为若干预应力单元模块,每个模块独立施加预应力,通过模块间的协同作用实现整体抗裂。可根据结构受力特点灵活调整预应力分布,针对超长结构不同区域的应力需求,精准施加不同大小的预应力。

4.3 新型施工工艺抗裂技术的应用

新型施工工艺抗裂技术通过改进流程与操作,减少施工对超长结构裂缝的诱发,应用强调精细化、标准

化。(1)超高性能混凝土(UHPC)薄层防护工艺。在超长结构表面喷涂或浇筑50-100mm厚UHPC防护层,凭借其超高强度、韧性与抗渗性,阻隔外界水分和腐蚀性介质,减少混凝土碳化、钢筋锈蚀引发的裂缝,同时承担部分表面拉应力,缓解主体结构受力。施工需控制UHPC配合比、浇筑速度及养护条件,保障与主体结构的粘结性能。(2)异步浇筑抗裂工艺。将超长混凝土结构沿长度方向划分为若干浇筑段,相邻段间隔1-2天浇筑。先浇段落提前释放部分收缩应力,降低后浇段落与先浇段落的约束,减少整体收缩应力积累。应用中需结合结构长度、混凝土凝结时间确定浇筑段长度与间隔,加强施工缝凿毛、杂物清理及界面剂涂刷,保证新旧混凝土粘结质量。(3)预应力孔道智能压浆工艺。在模块化预应力体系中,用智能压浆设备精确控制水泥浆水胶比、压力与流量,确保孔道压浆饱满密实,避免预应力筋锈蚀或预应力损失影响抗裂性能。设备实时监测压浆压力与流量,自动生成记录便于质量追溯,广泛应用于大型桥梁、高层建筑超长地下室等,提升预应力体系耐久性与抗裂效果^[4]。

结束语:本文通过对超长结构裂缝类型、成因、危害及抗裂技术的系统研究,得出以下结论:超长结构裂缝成因复杂,需从材料、设计、施工、环境多维度防控;传统抗裂关键技术是基础,新型抗裂技术为裂缝防控提供新路径,二者结合可提升抗裂效果。本研究成果可直接应用于超长结构工程实践,帮助工程人员制定科学抗裂方案,减少裂缝产生。

参考文献

- [1]郑礼群.地下钢筋混凝土结构裂缝控制技术研究与应用进展[J].福建建设科技,2025(3):55-58.
- [2]任海波.平面超长博物馆建筑结构抗裂技术研究[J].工程质量,2025,43(S1):43-45+56.
- [3]杜书先.超长地下室外墙混凝土抗裂防渗漏施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(4):038-041.
- [4]王旭斌.钢筋混凝土梁裂缝成因与控制措施探讨[J].漫科学(科技应用),2025(7):34-36.