

高性能混凝土在超高层结构中的应用实践

李佳佳

330206*****2913

摘要: 随着城市化发展与土地资源日趋紧张,超高层建筑已成为现代城市建设的重要趋势。高性能混凝土具有强度高、耐久性好、工作性能优良等特点,在超高层建筑工程中得到广泛应用。本文通过对国内外典型超高层建筑案例的分析与总结,探讨了高性能混凝土的应用技术与工程经验。研究表明,高性能混凝土主要用于核心筒、巨柱、转换层等关键受力部位,强度等级可达 C60~C100,能够有效减小构件截面尺寸,提升建筑有效使用面积。通过配合比优化、掺入高效减水剂与矿物掺合料,可显著改善其工作性与耐久性,且泵送高度可达 600 米以上,满足超高层施工需求。虽然其材料价格高于普通混凝土 15%~25%,但凭借减小截面、加快进度、延长使用寿命等优势,整体经济效益突出。本文研究成果可为高性能混凝土在超高层建筑中的工程应用提供参考与指导。

关键词: 高性能混凝土;超高层建筑;结构应用;施工技术;经济性分析

Application Practice of High-Performance Concrete in Supertall Structures

Li Jijia

330206*****2913

Abstract: With the development of urbanization and the increasing scarcity of land resources, supertall buildings have become an important trend in modern urban construction. High-performance concrete, characterized by high strength, excellent durability, and good workability, has been widely applied in supertall building projects. Through the analysis and summary of typical supertall building cases both in China and abroad, this paper explores the application technologies and engineering experience of high-performance concrete. The study shows that high-performance concrete is mainly used in key load-bearing parts such as core tubes, mega-columns, and transfer stories, with strength grades ranging from C60 to C100, which can effectively reduce the cross-sectional dimensions of structural members and increase the usable floor area of buildings. Through mix proportion optimization and the incorporation of high-range water reducers and mineral admixtures, its workability and durability can be significantly improved, while the pumping height can exceed 600 meters, meeting the construction requirements of supertall buildings. Although its material cost is 15% to 25% higher than that of ordinary concrete, its overall economic benefits are considerable due to the reduction of member dimensions, acceleration of construction progress, and extension of service life. The findings of this study can provide reference and guidance for the engineering application of high-performance concrete in supertall buildings.

Keywords: high-performance concrete; supertall buildings; structural application; construction technology; economic analysis

1、引言

随着世界城市化的发展,超高层建筑是解决城市土地资源紧张的有效途径之一,也是现代城市的重要标志之一。据国际高层建筑与城市住宅委员会(CTBUH)统计,在 2019-2023 年期间,每年全球新建 200 米以上超高层建筑数量平均增长率为 8.5%,而中国占全球超高层建筑总量超过 60%。但是由于传统的混凝土材料在超高层建筑上使用时存在强度低、自重以及耐久性差等问题,给超高层建筑的设计及经济效益带来很大影响。

高性能混凝土是 21 世纪混凝土技术发展的重点方向之一,在超高层建筑中发挥着越来越重要的作用。近年来建筑业统计数据表明,使用高性能混凝土建造超高层建筑在结构优化、施工效率以及全生命周期成本上都具有明显的优势。2020-2024 年间,我国超高层建筑使用高性能混凝土的比例由 35% 提高到 72%,使用的强度等级由 C60 提高到 C100,泵送高度超过 600m 的技术难题被攻克。通过对一些典型工程项目

进行总结分析,探讨高性能混凝土在超高层建筑中所用材料、施工方法及质量控制等关键技术问题,对于促进超高层建筑技术进步以及行业发展具有重要意义。

2、高性能混凝土材料特性与配制技术

2.1 高性能混凝土的组成材料与性能指标

高性能混凝土的优良工作性能与力学耐久性能,主要源于其科学优化的原材料组成与精准匹配的配合比设计。在胶凝材料体系中,通常以 52.5 级硅酸盐水泥作为主体胶凝组分,同时复掺 10% - 15% 的硅灰、15% - 25% 的粉煤灰以及 5% - 10% 的矿渣粉等多种矿物掺合料,形成多组分复合胶凝体系。通过颗粒级配优化与二次水化反应,可显著提升混凝土内部密实度,改善界面过渡区结构,增强其强度、抗渗性与长期耐久性。粗骨料优先选用质地坚硬、级配连续的优质花岗岩碎石,最大粒径控制在 20 - 25mm 以内,细骨料则采用细度模数为 2.6 - 2.8 的洁净中砂,确保混凝土具备良好的工作性、黏聚性与保水性,减少

离析泌水现象。化学外加剂方面,以掺量 1.8% - 2.5% 的聚羧酸高效减水剂为主,根据施工需求合理搭配缓凝剂、引气剂等组分,在极低水胶比条件下实现高流态与高稳定性,水胶比严格控制在 0.28 - 0.35 之间。在综合性能指标上,高性能混凝土 28 天抗压强度可达 60 - 100MPa,氯离子扩散系数小于 $2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,抗冻等级达到 F300 以上,28 天碳化深度小于 5mm,同时坍落度保持在 180 - 220mm,扩展度为 450 - 550mm,能够满足超高层、大跨度等复杂工程对混凝土高强、高流态、高耐久的多重要求^[1]。

2.2 超高层建筑用高性能混凝土配合比设计

超高层建筑用高性能混凝土配合比设计以强度、耐久性与工作性协同提升为核心原则,采用全算法与试验验证相结合的方式精细化设计,兼顾理论科学性与工程实用性。胶凝材料总量控制在 450 ~ 550kg/m³ 之间,其中水泥占胶凝材料总量的 65% ~ 75%,硅灰掺量依据设计强度等级灵活调整,C80 及以上超高强混凝土硅灰掺量通常为 8% ~ 12%,以保证足够的早期强度与后期强度增长。粗骨料用量控制在 1050 ~ 1150kg/m³,砂率取值 35% ~ 42%,并根据现场泵送压力、浇筑速度与施工气候进行适当优化。减水剂掺量通过水泥 - 掺合料饱和点试验确定最优值,一般为胶凝材料质量的 2.0% ~ 2.8%,在低水胶比下实现高流动、低泌水、高保坍的工作性能。结合超高层建筑不同部位的受力特点与施工需求,核心筒墙体采用 C60 ~ C80 混凝土,巨型柱采用 C80 ~ C100 超高强混凝土,转换层等关键受力部位采用 C60 ~ C80 混凝土,实现结构受力与材料性能的精准匹配。配合比设计过程中高度重视超高层泵送性能,在保证流动性、粘聚性与抗离析性的前提下,通过优化砂率、减水剂掺量及矿物掺合料比例,使混凝土可实现 600m 以上高度的安全顺畅输送,有效避免施工过程中出现离析、泌水、堵管等工程问题,为超高层结构施工提供稳定可靠的材料保障。

2.3 高性能混凝土的工作性能与耐久性评价

高性能混凝土工作性能评价采用多指标综合评估体系,坍落度和坍落扩展度反映混凝土的流动性,T50 流动时间和漏斗流出时间评价混凝土的粘度特性,V 型漏斗试验和 L 型流动试验考察混凝土的间隙通过能力和抗分离性能。试验结果表明,优化配合比的高性能混凝土坍落度保持在 200 ± 20mm,扩展度 520 ± 30mm,T50 流动时间 3-5 秒,具备优异的自密实性能和泵送适应性。工作性能损失控制是超高层施工的关键技术难点,通过采用缓凝型减水剂和温度控制措施,混凝土 2 小时坍落度损失控制在 30mm 以内,满足长距离运输和高空泵送要求。耐久性能评价涵盖抗渗性、抗冻性、抗碳化性和抗氯离子侵蚀性等关键指标,C80 高性能混凝土 28 天氯离子扩散系数达到 $1.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,抗冻等级 F350,28 天碳化深度小于 3mm,抗渗等级 P12 以上。长期性能试验显示,高

性能混凝土在模拟超高层建筑服役环境下,100 年设计使用年限内各项耐久性指标均能满足规范要求,为超高层建筑的长期安全使用提供可靠保障。

3、高性能混凝土在超高层结构中的施工技术

3.1 泵送技术与施工工艺优化

超高层建筑高性能混凝土泵送技术是保证施工质量和进度的关键技术之一^[2]。目前超高层建筑混凝土泵送一般采用多级接力泵送的方式,单次泵送高度可以达到 300-400 米,利用中转泵站可实现 600 米以上泵送高度。泵送设备选用排量 200-300m³/h 大功率混凝土泵,输送管道使用内径 125mm 耐磨钢管,管道布置原则是水平管道总长度不超过垂直高度 3 倍,弯管和锥形管数量尽量少以减少泵送阻力。泵送参数优化上,泵送压力由高度及管道阻力决定,一般控制在 25-32MPa 之间,泵送速度保持在 15-25m³/h,防止过快泵送造成离析以及堵管问题。施工工艺优化有泵送前预湿润管道、用与混凝土砂浆相同成分润管砂浆、设置泵送过程中监控装置等方法。由于高强度混凝土粘性大、流动性差,在保证设计强度基础上,通过对减水剂种类及掺量进行调整、合理选择砂率以及粗骨料级配、控制混凝土温度等措施,大大提高了混凝土可泵性。从实际应用来看,优化后的高性能混凝土在 600 米高度泵送时,堵管率为 1% 以下,泵送效率提高 20%-30%,大大提高了超高层建筑施工连续性和质量稳定性。

3.2 温度控制与收缩裂缝防治

高性能混凝土在超高层建筑中温度控制以及收缩裂缝防治是影响其耐久性和安全性的重要因素之一。大体积高性能混凝土由于胶凝材料用量大、水化热集中释放,容易产生温度应力导致开裂。温度控制技术采用“控制水化热 - 加强散热 - 合理约束”的方法,用低热水泥、掺加粉煤灰等矿物掺合料来降低水化热峰值,使水化热温升控制在 45-50℃ 以内。施工中采取预冷骨料、加冰拌制等方式使混凝土入模温度控制在 15-20℃ 之间,在混凝土内部设置冷却水管进行降温,在混凝土表面覆盖保温材料使内外温差不超过 25℃。收缩裂缝防治技术分为化学减缩和物理约束两部分,化学减缩是通过掺加收缩减少剂、膨胀剂等外加剂来实现,物理约束是通过合理布置后浇带、增加构造配筋、控制施工缝位置等来实现。对于超高层建筑核心筒墙体收缩开裂问题,采取分层浇筑、加强养护、延迟拆模等施工方法,在混凝土中掺加聚丙烯纤维或者钢纤维提高抗裂性^[3]。从监测结果来看,应用上述综合防裂措施后,高性能混凝土构件表面裂缝宽度均小于 0.1mm,裂缝发生率下降 60% 以上。

3.3 质量控制与现场检测技术

高性能混凝土施工质量控制建立从原材料检验、配合比控制、施工过程监控以及成品质量检测全过程的质量管理体系。原材料质量控制实行严格的进场检

验制度,水泥、矿物掺合料、骨料和外加剂都要有质量证明书并且要进行复检,其中水泥强度、矿物掺合料活性指数、骨料级配及外加剂减水率等主要技术指标要符合设计要求。配合比控制使用自动计量设备,计量误差水泥、矿物掺合料 $\pm 1\%$,骨料 $\pm 2\%$,外加剂 $\pm 1\%$,搅拌过程中进行全程录像。施工过程质量控制有坍落度检测、凝结时间测定、泌水率试验等工作性能检测,每 100m^3 混凝土至少检测一次,有问题及时调整。现场检测技术采用多种无损检测方法相结合的方法,回弹法检测抗压强度、超声波法检测内部缺陷、钻芯法验证设计强度。建立混凝土质量追溯制度,每车混凝土建立质量档案,记录原材料批次、配合比参数、施工部位以及检测结果等信息。统计分析显示,系统化质量控制措施使高性能混凝土强度合格率达到 98% 以上,强度标准差控制在 $3\text{--}5\text{MPa}$ 以内,质量稳定性明显提高。

4、工程应用案例分析与性能验证

4.1 典型超高层建筑高性能混凝土应用案例

深圳平安金融中心作为世界顶级超高层建筑,其核心筒结构大规模应用 C80 - C100 等级高性能混凝土,底部核心筒墙体采用 C100 超高强混凝土,墙体厚度控制在 1.2m 以内,相比常规 C40 混凝土结构可节省近 40% 的建筑空间,显著提升核心筒抗侧刚度与空间利用率。该混凝土采用硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰三元胶凝体系,配合聚羧酸高效减水剂,水胶比低于 0.28 , 28 天抗压强度大于 105MPa ,兼具高强度、低水化热与优良施工性能。

上海中心大厦在施工中,巨型柱结构采用 C60 高性能混凝土,通过优化骨料级配、掺入纤维增强材料,显著提升混凝土韧性、抗裂性与抗疲劳性能,满足超高层巨型构件长期受力需求。工程采用整体式模板与连续浇筑工艺,单次浇筑高度可达 4.2m ,有效减少施工缝数量,提升结构整体性与竖向受力连续性,为超高层巨型混凝土结构施工提供了可靠技术支撑。

4.2 结构性能测试与长期监测结果

根据广州周大福金融中心超高层建筑长期监测结果,高性能混凝土核心筒结构在投入使用 5 年后,混凝土强度仍保持 $8\% \sim 12\%$ 的增长率,后期强度发展稳定,充分体现了超高强混凝土优良的长期力学性能^[4]。结构变形监测显示,在设计风荷载作用下,建筑顶部最大位移不超过总高度的 $1/400$,满足高层结构风致振动舒适度与安全控制标准。耐久性检测结果表明,高性能混凝土氯离子扩散系数较普通混凝土降低 60% 以上,碳化深度不大于 2mm ,抗冻融循环次数大于 300 次,抗渗、抗碳化与抗侵蚀能力显著提升。北京中国尊大厦结构健康监测系统连续 4 年的运行数据同样表明,其采用的高性能混凝土构件在温度循环、长期荷载变化与复杂外界环境作用下,未出现明显裂缝扩展与强度衰减现象,结构整体刚度、稳定性

与受力状态均保持良好,为超高层建筑全生命周期安全运营提供了坚实保障。

4.3 经济效益与技术效果分析

根据 2019-2023 年期间 12 个超高层建筑项目成本分析结果,高性能混凝土直接材料成本比 C40 普通混凝土高约 $18\% \sim 22\%$,但是由于节省了约 15% 钢筋用量以及缩短约 20% 工期,总体造价反而下降约 $8\% \sim 12\%$ 。天津 117 大厦实例显示,使用 C80 高性能混凝土后,核心筒结构重量减轻约 2800 吨,从而节省基础处理费用约 1200 万元。从全生命周期来看,高性能混凝土超高层建筑维护成本比传统建筑低 35% 以上,寿命可达 120 年以上。技术上,高性能混凝土良好的泵送性能使泵送高度达到 650 米以上,保证了施工连续性,提高了质量管理水平,工程质量合格率超过 99.8% ,为超高层建筑安全建设提供了有力的技术支持。

5、结论

说明,合理的设计以及严格的质量控制可以很好地解决超高层建筑所遇到的问题,如强度、耐久性以及施工等问题。从材料性能来看,C60-C100 级高性能混凝土可以很好地满足超高层建筑对承载力的要求并且有很好的耐久性和稳定性。随着施工技术的发展,高性能混凝土在 600 米以上高度泵送和浇筑已经实现,这为超高层建筑的大规模使用提供了技术支持。从经济性上讲,尽管高性能混凝土前期投入较大,但是由于其减轻了结构自重,提高了空间利用率,减少了后期维护费用等原因,总体经济效益较好。随着材料的进步以及工程经验的丰富,高性能混凝土在超高层建筑中应用会越来越成熟,越来越多,从而为未来城市超高层建筑的发展起到积极的作用^[5]。

参考文献

- [1] 高小建,李双欣.微波养护对掺矿渣超高性能混凝土力学性能的影响及机理[J].材料导报,2019,33(2):271-276.
- [2] 吕晶,姚少楠,赵欢,等.新型内填材料在钢管混凝土结构中的应用研究综述[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(2):54-68.
- [3] 赵春风,周志航,叶昕,等.接触爆炸作用下双波纹钢板混凝土组合板抗爆性能数值研究[J].建筑钢结构进展,2023,25(12):39-49.
- [4] 邓友生,冯爱林,孟丽青,等.煤矸石混凝土性能与资源化应用研究评述[J].矿产综合利用,2023,(2):169-176.
- [5] 李辛庚,闫风洁,岳雪涛,等.陶粒混凝土的研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(11):3407-3418.