

混凝土性能优化与质量控制

蒋帛霖¹ 包金泉¹ 李常君²

1. 内蒙古蒙东水务有限公司 内蒙古 通辽 028000

2. 内蒙古工程项目管理有限公司 内蒙古 通辽 028000

摘要: 混凝土作为现代土木工程中应用最广泛、用量最大的建筑材料,其性能直接关系到工程结构的安全性、耐久性与服役寿命。随着建筑技术的发展和工程需求的日益复杂化,对混凝土的性能提出了更高、更全面的要求。本文系统探讨了混凝土性能优化的核心路径与质量控制的关键环节。首先,从原材料选择与配合比设计入手,阐述了高性能混凝土(HPC)和超高性能混凝土(UHPC)的配制原理;其次,深入分析了工作性、强度、耐久性三大核心性能的优化策略,包括外加剂技术、矿物掺合料应用及微观结构调控;再次,构建了涵盖原材料进场、生产拌合、运输浇筑、养护全过程的质量控制体系,并强调了信息化与智能化技术在现代质量控制中的重要作用。研究表明,通过科学的材料设计、精细化的过程控制与先进的管理手段,可实现混凝土综合性能的显著提升与工程质量的可靠保障。

关键词: 混凝土;性能优化;质量控制;配合比设计;耐久性;智能建造

引言

自19世纪波特兰水泥问世以来,混凝土以其原料丰富、成本低廉、可塑性强、抗压性能优异等特点,迅速成为全球基础设施建设的基石。进入21世纪,人类社会面临着城市化进程加速、极端气候频发、资源环境约束趋紧等多重挑战。在此背景下,传统混凝土已难以满足超高层建筑、跨海大桥、高速铁路、核电站等重大工程对材料性能提出的严苛要求。同时,混凝土行业作为高能耗、高碳排放的产业,其绿色转型亦迫在眉睫。因此,“混凝土性能优化”与“质量控制”已成为当前混凝土科技领域的两大核心命题。性能优化旨在通过材料科学与工程技术的融合,赋予混凝土超越传统性能极限的力学、耐久及功能性特征;而质量控制则是确保这些优化成果能够在实际工程中稳定、可靠地实现的根本保障。二者相辅相成,共同构成了现代高性能混凝土技术体系的支柱。

1 混凝土性能优化的理论基础与技术路径

混凝土性能优化的理论基础在于对原材料的精细化选择、配合比设计的科学化以及微观结构的主动调控。应根据工程环境与性能需求,合理选用低热水泥、优质骨料及高效减水剂,并充分利用粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料以改善工作性、降低水化热并提升耐久性。配合比设计需从经验法转向基于性能的多目标优化方法,以水胶比为核心参数,在满足强度与施工性的前提下兼顾经济性与可持续性。更深层次的优化则聚焦于微观结构,通过降低水胶比和掺入超细掺合料强化界面过渡区(ITZ),细化孔隙结构,从而构建致密、均匀、稳定的内部体系,为混凝土宏观性能全面提升奠定基础。

2 核心性能的优化策略

2.1 工作性优化

良好的工作性是混凝土从搅拌站顺利输送到结构内部并实现充分密实的前提条件,尤其在现代泵送施工和复杂配筋结构中显得尤为重要。工作性并非单一指标,而是流动性、粘聚性与保水性三者的综合体现。为实现高流态而不离析泌水的目标,聚羧酸系高性能减水剂的应用起到了革命性作用。其分子结构可被定制,不仅能提供高达30%以上的减水率,还能通过空间位阻效应有效维持坍落度的经时稳定性,满足长距离运输和长时间浇筑的需求。然而,对于自密实混凝土(SCC)这类极高流动性的拌合物,单纯依靠减水剂可能导致浆体粘度过低,引发骨料下沉和浆体上浮的离析风险^[1]。此时,适量引入粘度改性剂(VMA)便成为关键,它能适度增加连续相的粘度,提升拌合物的整体内聚力,从而在保持高流动性的同时确保其稳定性。与此同时,骨料的级配设计也不容忽视。采用连续级配或经过优化的“双峰”级配,可以最大限度地减少骨料颗粒间的摩擦阻力,使浆体更易于流动,从而在不增加用水量的情况下改善整体工作性。

2.2 力学性能优化

力学性能,尤其是抗压强度,长期以来是混凝土设计的核心指标。然而,现代工程对混凝土的要求已从单纯的“高强”向“高强、高韧、高稳定性”的综合性能转变。实现高强度的根本途径在于构建一个致密的胶凝体系,这主要通过极低的水胶比和高活性的胶凝材料组合来达成。超高性能混凝土(UHPC)正是这一理念的极致体现,其通过水胶比低于0.25、大量掺入硅灰以及精细

的颗粒堆积设计,可获得超过150MPa的惊人抗压强度。然而,高强混凝土往往伴随着脆性增大、开裂敏感性提高的问题。为克服这一缺陷,纤维增强技术被广泛应用。无论是钢纤维、合成纤维还是玄武岩纤维,它们都能在混凝土基体中形成三维乱向的增强网络,在微裂缝萌生时通过桥接作用吸收能量,显著提升材料的抗裂性、韧性和抗冲击能力。特别是钢纤维增强的UHPC(SFR-UHPC),甚至能表现出应变硬化行为,使其从传统意义上的脆性材料转变为一种准延性复合材料。除了强度与韧性,体积稳定性同样是力学性能的重要组成部分,尤其是在大体积混凝土结构中。水化热引起的内外温差是导致温度裂缝的主要原因。对此,需采取综合温控防裂措施,包括在配合比设计阶段大量掺入粉煤灰或矿粉以降低总水化热,施工中采用预冷骨料、埋设冷却水管进行内部降温,并在浇筑后加强保温保湿养护以减缓内外温差的发展速率,从而有效预防有害裂缝的产生。

2.3 耐久性优化

如果说强度决定了混凝土结构的承载能力,那么耐久性则直接关乎其服役寿命与全寿命周期成本。在严酷的服役环境下,混凝土可能面临多种劣化机制的侵蚀,因此,耐久性优化是一项系统性工程。在海洋工程或使用除冰盐的道路桥梁中,氯离子渗透导致的钢筋锈蚀是最普遍且最具破坏性的问题。针对此,核心策略是构筑一道致密的物理屏障,通过降低水胶比和掺入优质矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣粉)来细化孔隙结构,大幅降低氯离子的扩散系数,从而延缓其到达钢筋表面的时间。在寒冷地区,冻融循环破坏是另一大威胁。水在孔隙中结冰膨胀产生的压力会反复作用于孔壁,最终导致表层剥落。引气技术是公认的最有效对策,通过引入大量直径在10~200微米之间、互不连通的微小气泡,为结冰膨胀提供充足的缓冲空间,从而保护水泥石结构免受破坏^[2]。对于处于硫酸盐土壤或地下水环境中的结构,硫酸根离子会与水泥水化产物发生反应生成膨胀性物质,导致开裂。对此,应选用C3A含量低的抗硫酸盐水泥,并辅以矿渣粉或硅灰的掺入,利用其二次水化产物的稳定性来抵抗侵蚀。此外,碱-骨料反应(AAR)是一种潜在的、长期的膨胀破坏模式,其预防关键在于源头控制,即严格限制水泥的总碱含量、选用非活性骨料,或通过掺入足量的锂盐或矿物掺合料来抑制反应的发生。

3 混凝土质量控制体系的构建

3.1 原材料质量控制

建立一套严格的原材料质量控制体系是整个质量管理链条的基石。首先,应实施供应商准入与动态评估机

制,选择那些具备稳定生产工艺和健全质量保证体系的合格供应商,并定期对其履约能力进行复审。其次,必须严格执行进场检验制度,依据国家及行业相关标准,对每一批次的水泥、骨料、外加剂及矿物掺合料进行抽样检测。检测项目应聚焦于影响混凝土性能的关键指标,如水泥的强度、安定性与凝结时间,骨料的级配、含泥量与压碎值,外加剂的减水率、含气量及与胶凝材料的相容性等。任何一项指标不合格的材料都不得投入使用。最后,仓储管理同样至关重要。不同品种、规格的材料必须分区、分仓存放,并设置清晰醒目的标识,严防混用。对于易受潮的粉状材料如水泥和掺合料,应确保库房干燥通风;对于液体外加剂,则需采取防晒、防高温措施,以维持其化学稳定性。

3.2 生产与拌合过程控制

计量系统的准确性是首要保障,搅拌站的所有计量设备,特别是对水和液体外加剂的计量装置,必须定期由法定计量部门进行校准,确保其误差严格控制在规范允许的范围内(通常水和外加剂的计量误差不应超过 $\pm 1\%$)。在此基础上,搅拌工艺的合理性同样不可忽视。必须保证足够的搅拌时间,使各种组分充分混合均匀,形成均质的拌合物。对于掺有纤维或粘稠型外加剂的特殊混凝土,可能需要调整投料顺序(如先加入部分水和胶凝材料进行预搅拌)或适当延长搅拌时间,以确保纤维分散均匀且无结团。出厂前的质量检验是最后一道防线,每车混凝土在离开搅拌站前,都必须现场检测其坍落度、扩展度或含气量等关键工作性指标,并按规定制作标准养护试件和同条件养护试件,用于后续的质量评定与质量追溯。

3.3 运输、浇筑与振捣控制

混凝土从搅拌站到最终成型为结构构件,中间经历的运输、浇筑与振捣环节极易引入质量隐患,必须进行精细化管理。在运输阶段,应使用专用的搅拌运输车,并在途中保持罐体慢速转动,以防止混凝土发生离析。同时,应通过信息化手段合理规划运输路线和调度,尽量缩短运输时间,避免因等待过久而导致工作性损失。一旦到达施工现场,浇筑作业必须严格按照预先编制的专项方案执行。方案应明确分层厚度、浇筑方向、布料点间距等细节,并根据季节特点采取相应措施,如夏季避开正午高温时段以减少水分蒸发,冬季则需对模板和钢筋进行预热并采取保温措施^[3]。一个绝对禁止的行为是,严禁现场操作人员为恢复坍落度而随意向运输车内加水,这种做法会严重破坏原有的水胶比,导致强度和耐久性急剧下降。浇筑后的振捣是确保混凝土密实成型的关键步骤。应根据结构部位和钢筋密集程度,选用合适的振捣

设备(如插入式、平板式或附着式振动器),并由经验丰富的工人操作,做到“快插慢拔、插点均匀”,既要保证混凝土内部气泡充分排出,又要避免因欠振形成蜂窝麻面或因过振导致粗骨料下沉、浆体上浮的离析现象。

3.4 养护控制

养护是混凝土性能,尤其是耐久性得以充分发展的决定性阶段,但这一环节在实际工程中却常常被轻视或简化。科学的养护必须强调及时性与充分性。所谓及时性,是指养护工作应在混凝土终凝后立即开始,以防止早期塑性收缩裂缝的产生。所谓充分性,则体现在养护时间和环境条件的保障上。对于绝大多数普通混凝土,应保证不少于14天的湿养护,而对于掺有大量粉煤灰、矿粉等后期强度发展型矿物掺合料的混凝土,其养护时间还应适当延长,以确保二次水化反应的充分进行。在干燥、大风或炎热的环境中,单纯洒水难以维持表面湿润,此时应采用覆盖保水的方法,如铺设土工布、草帘或塑料薄膜,并定期洒水保持其湿润状态。在冬季低温条件下,养护的重点则转为保温与防冻,需通过覆盖保温材料、搭设暖棚甚至通入蒸汽等方式,确保混凝土在正温环境下完成早期强度发展,避免因早期受冻而造成永久性损伤。

3.5 信息化与智能化质量控制

随着新一轮科技革命的兴起,物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术正深度融入工程建设领域,为混凝土质量控制带来了前所未有的变革机遇。现代化的智能搅拌站已不再是简单的生产单元,而是集成了各类传感器的数据中心。通过实时监控原材料库存、计量秤的瞬时读数、搅拌主机的电流负荷等参数,系统可以自动识别异常并进行预警,甚至能根据环境温湿度变化微调配合比中的用水量,实现生产过程的闭环智能控制。在运输环节,车载GPS与传感器可以实时回传混凝土的温度、罐体转速、地理位置等信息,使得调度中心能够精准掌

握每一车混凝土的状态,为现场浇筑提供决策支持,并建立起完整的质量追溯链条。在结构服役阶段,无损检测技术与结构健康监测系统的应用,使得对混凝土内部质量的评估不再依赖于破坏性取芯^[4]。通过定期采集超声波传播速度、电阻率或雷达反射信号等数据,可以无损地评估混凝土的密实度、裂缝发展及钢筋锈蚀状况,从而为结构的维护、加固或退役决策提供科学依据,真正实现了从“被动修补”到“主动预防”的转变。

4 结语

混凝土性能优化与质量控制是复杂系统工程,涉及多学科交叉融合。研究表明,性能优化核心在于材料设计精细化与微观结构致密化,科学选材、采用基于性能的配合比设计、利用外加剂与矿物掺合料协同效应,可提升混凝土多项性能;质量控制是性能优化成果落地的保障,需建立覆盖全过程的标准化体系,辅以严格管理制度与人员培训;技术创新是驱动发展的关键,信息化、智能化技术正变革传统质控模式;可持续发展是未来方向,融入绿色低碳理念、发展固废利用和长寿命混凝土是行业高质量发展必由之路。展望未来,前沿科技渗透将让混凝土有更卓越性能与广阔前景,但科技工作者对材料本质的理解和对工程质量的追求始终不变。

参考文献

- [1]陈锐,颜智法.三维约束对补偿收缩混凝土力学性能的影响[J].土木工程与绿色建筑,2025,1(06):81-84+103.
- [2]吴崑宇.低温作用下高延性混凝土力学性能试验研究[J].上海建材,2025,(06):83-86+95.
- [3]刘志健.混凝土建筑施工技术与质量控制[J].中国水泥,2025,(12):72-74.
- [4]毕振毅.混凝土建筑材料试验检测及相关质量控制[J].科学技术创新,2025,(23):129-132.