

高性能混凝土在绿色建筑工程中的配合比设计

赵英龙

河北襄筑建筑科技有限责任公司 河北 邢台 054700

摘要:为适配绿色建筑低碳、耐久、节能的发展需求,本文围绕绿色建筑工程下高性能混凝土的配合比设计展开研究。依托性能、绿色、经济三大设计原则,通过原材料优选、多梯度水胶比与矿物掺合料正交试验,确定最优配合比参数。经工程实践验证,该配比混凝土力学、耐久性能优异,可高效消纳工业固废、降低碳排放与施工成本,契合绿色建筑全生命周期发展要求,具备较高工程推广价值。

关键词:高性能混凝土;绿色建筑工程;配合比设计

引言:双碳背景下,绿色建筑成为建筑行业转型升级的核心方向,高性能混凝土凭借高强度、高耐久、低碳环保的特性,成为绿色建筑工程的核心用材。传统混凝土存在能耗高、耐久性差、固废利用率低等问题,难以适配绿色建筑严苛的性能与环保标准。为解决上述问题,本文结合工程实际,开展高性能混凝土配合比优化设计试验,探究适配绿色建筑的最优配比方案,为绿色建筑工程用材优化提供实践参考。

1 绿色建筑用高性能混凝土核心理论与性能要求

1.1 绿色建筑与高性能混凝土适配理论

(1) 绿色建筑节能、低碳、环保、耐久的核心评价标准。绿色建筑以全生命周期环境负荷最小化为目标,其评价体系聚焦于降低建筑能耗、减少碳排放、控制污染物排放以及延长服役寿命,要求建筑材料在生产、施工、运维及拆除各环节均满足资源节约与环境友好要求。(2) 高性能混凝土高强度、高耐久、低能耗的核心特性。高性能混凝土通过优化胶凝材料体系与微结构设计,实现优异力学性能的同时,显著提升结构密度与长期稳定性,其低水胶比与矿物掺合料的协同效应使材料本征能耗大幅降低。(3) 二者协同适配的核心机理与应用优势。适配机理建立在“性能—环境—经济”三元协同框架之上,即高性能混凝土的耐久性提升可直接延长建筑服役年限,减少维护与重建资源消耗,从而在宏观层面实现节能减排与低碳排放的绿色目标。

1.2 绿色建筑工况下高性能混凝土性能指标要求

(1) 力学性能要求,涵盖抗压、抗拉、抗折强度指标。绿色建筑用高性能混凝土需满足设计强度等级要求,同时保证抗拉强度与抗折强度满足结构安全与抗震构造要求,一般不低于相应强度等级的标准限值。(2) 耐久性能要求,包含抗渗、抗冻、抗腐蚀、抗碳化性能。关键指标包括电通量、冻融循环次数、氯离子扩散

系数及碳化深度,需根据建筑所处环境类别确定具体等级,确保设计使用年限内结构性能不劣化。(3) 绿色环保性能要求,低碳排放、低水化热、固废利用率指标。单位产品碳排放须满足国家绿色建材评价标准,水化热控制宜采用大掺量矿物掺合料方案,工业固废利用率不低于30%^[1]。

1.3 高性能混凝土配合比设计基本原则

(1) 性能优先原则,兼顾强度与长期耐久性。配合比设计应以结构设计强度为约束下限,以耐久性指标为长期服役保障,通过水胶比优化与掺合料复配实现强度与抗渗、抗冻等耐久参数的协同提升,避免“以强度代耐久”的传统误区。(2) 绿色低碳原则,最大化利用工业固废、降低资源消耗。在满足性能前提下,优先选用高炉矿渣、粉煤灰、钢渣等本地化工业废弃物替代水泥,减少天然骨料开采,降低运输能耗;同时引入再生骨料并控制其取代率,实现资源循环利用与碳减排双目标。(3) 经济适配原则,适配建筑工程工况、控制施工成本。配合比设计应结合具体工程结构特点、施工工艺与气候条件,分层分级设定性能目标,避免过度设计;通过当地材料资源优选与掺合料优化降低成本,确保绿色建筑在全生命周期内兼具环保效益与经济效益。

2 绿色建筑工程中高性能混凝土配合比设计试验

2.1 试验原材料选型与性能检测

(1) 胶凝材料:水泥选用P·O42.5级,比表面积 $350 \sim 380 \text{ m}^2/\text{kg}$,28d抗压强度 $\geq 48.0 \text{ MPa}$,初凝 $\geq 45 \text{ min}$,安定性合格。粉煤灰为I级低钙灰,45 μm 筛余 $\leq 12\%$,烧失量 $\leq 3.0\%$,需水量比 $\leq 95\%$,7d活性指数 $\geq 75\%$ 。矿粉为S95级,比表面积 $\geq 400 \text{ m}^2/\text{kg}$,流动度比 $\geq 95\%$,28d活性指数 $\geq 95\%$ 。多组分协同取代水泥,降低水化热与碳排放。(2) 骨料:粗骨料为5~25mm连续级配碎石,针片状 $\leq 8\%$,含泥量 $\leq$

1.0%，泥块含量0，压碎指标 $\leq 10\%$ ，硫酸钠法坚固性质量损失 $\leq 8\%$ ，表观密度 $\geq 2600\text{kg/m}^3$ 。细骨料为Ⅱ区中砂，细度模数2.6~2.9，含泥量 $\leq 2.0\%$ ，泥块 $\leq 0.5\%$ ，坚固性损失 $\leq 6\%$ ，氯离子 $\leq 0.02\%$ 。骨料级配优化后空隙率 $\leq 38\%$ ，减少浆体用量。（3）外加剂与拌合水：采用聚羧酸系高性能减水剂，减水率 $\geq 28\%$ ，含气量2.5%~4.0%，泌水率比 $\leq 60\%$ ，28d收缩率比 $\leq 100\%$ ，甲醛 $\leq 0.05\%$ 。选用缓凝型，初凝延长2~4h，无有害重金属，满足绿色认证。拌合水为生活饮用水，pH值5.0~8.0，硫酸盐 $\leq 0.2\text{g/L}$ ，氯离子 $\leq 0.1\text{g/L}$ 。

2.2 配合比设计方案拟定

（1）水胶比梯度设计，结合绿色建筑低水化热需求确定参数范围。针对绿色建筑大体积构件施工对温度控制的要求，设定水胶比三梯度：0.28、0.32、0.36。低水胶比有利于强度与密实度提升，但需兼顾水化热集中释放问题；高水胶比可降低水化温升，配合缓凝外加剂共同防止早期温度裂缝，同时确保强度满足设计要求。

（2）骨料掺配比例优化，保障混凝土密实度与稳定性。粗骨料采用5~16mm与16~25mm二级配，质量比40:60混配，紧密堆积空隙率降至38%以下。细骨料以中砂与机制砂按质量比7:3掺配，机制砂石粉含量控制在5%~8%，改善级配完整性。砂率设定38%~42%，随水胶比调整最优砂率，保证新拌混凝土粘聚性良好、不离析^[2]。

（3）矿物掺合料与外加剂掺量梯度试验方案。设计三因素三水平正交试验：粉煤灰掺量15%~25%，矿粉掺量20%~35%，硅灰掺量0%~6%；减水剂掺量按胶凝材料总量1.2%~2.0%梯度变化，缓凝组分掺量按初凝时间调控需求设置。共9组基准配合比加1组空白对照，系统考察各因素对综合性能的影响规律。

2.3 混凝土性能试验与结果分析

（1）不同配合比下混凝土工作性能，坍落度、流动性、保水性测试分析。新拌混凝土坍落度控制目标180~220mm（大流动性）与80~120mm（普通振捣）两档，扩展度450~650mm。试验表明：水胶比0.32、砂率40%、总掺合料45%时，坍落度210mm，扩展度580mm，倒筒排空时间 $\leq 5\text{s}$ ，粘聚性良好，2h经时损失 $\leq 20\text{mm}$ ，无泌水离析。（2）不同配合比下混凝土力学性能，不同龄期强度变化规律分析。各配合比成型试件测试3d、7d、28d、60d抗压强度及28d劈拉、抗折强度。水胶比0.28组28d强度达68.5MPa但早期强度偏高；水胶比0.32、掺合料总量45%组28d强度为59.3MPa，60d增长至67.8MPa，后期强度持续增长，满足绿色建筑长期服役需求^[3]。（3）不同配合比下混凝土耐久与环保性能测

试结果对比。抗渗等级：水胶比0.28组达P14，0.32组达P12以上；300次冻融后相对动弹性模量保持率 $\geq 92\%$ ，质量损失率 $\leq 3\%$ ；56d电通量最低降至680C；28d碳化深度 $\leq 3\text{mm}$ 。环保方面，固废总掺量最高达50%，单位混凝土碳排放较基准降低32%~38%，水化热峰值降低25%~30%。

2.4 最优配合比方案确定

（1）基于综合性能的配合比参数筛选标准。以力学性能（28d抗压 $\geq 55\text{MPa}$ 、抗折 $\geq 6.0\text{MPa}$ ）、耐久性能（抗渗 $\geq \text{P12}$ 、电通量 $\leq 800\text{C}$ 、抗冻 $\geq \text{F300}$ ）、工作性能（坍落度 $\geq 180\text{mm}$ ）为硬性约束，以碳排放降低率 $\geq 30\%$ 、固废利用率 $\geq 40\%$ 为优选权重，进行综合评分排序，确定最优配比。（2）最优配合比方案的各项参数指标汇总。最优配合比：水胶比0.32，砂率40%，胶凝材料总量450kg/m³（水泥220kg/m³占比48.9%、粉煤灰90kg/m³占20%、矿粉130kg/m³占28.9%、硅灰10kg/m³占2.2%）；粗骨料1080kg/m³（二级配40:60），细骨料720kg/m³（中砂:机制砂=7:3）；减水剂掺量1.6%，缓凝组分0.1%，水144kg/m³。28d抗压59.3MPa，56d电通量680C，抗渗P12，抗冻 $\geq \text{F300}$ ，坍落度210mm^[4]。（3）最优方案的绿色节能与经济性优势分析。该方案每立方米利用工业固废230kg，替代水泥约230kg，节约成本约69元/m³，降低CO₂排放约204kg/m³（降幅36%）。水化热峰值降低28%，有效规避大体积混凝土温度裂缝，减少后期修补费用。混凝土后期强度持续增长，建筑服役寿命延长，全生命周期综合成本降低约18%~22%，环境与社会效益显著。

3 高性能混凝土在绿色建筑工程中配合比应用与效果评价

3.1 工程概况与施工工况

（1）绿色建筑工程项目基本参数、结构特点。某绿色建筑三星级工程，总建筑面积6.8万m²，地下2层、地上26层，建筑高度82.5m，框剪结构。基础底板厚2.0m，核心筒墙体配筋密集，箍筋间距100mm，要求混凝土兼具大流动性与低水化热特性，满足绿色建材认证标准。（2）工程施工环境、技术难点与混凝土应用要求。工程地处夏热冬冷地区，施工期环境温度28~38℃。技术难点：底板温度裂缝防控、超高层泵送（约80m）稳定性保障。应用要求：28d抗压 $\geq 55\text{MPa}$ ，抗渗 $\geq \text{P12}$ ，抗冻 $\geq \text{F300}$ ，坍落度 $\geq 200\text{mm}$ ，水化热峰值 $\leq 260\text{kJ/kg}$ 。

3.2 最优配合比现场施工应用工艺

（1）现场拌合、运输与浇筑施工控制要点。采用

集中搅拌站生产,实时检测骨料含水率并调整配合比。聚羧酸减水剂采用后掺法,搅拌时间 $\geq 90\text{s}$ 。运输过程搅拌车慢速转动,控制到场时间 $\leq 1\text{h}$,每车检测坍落度,不合格严禁入模。浇筑采用泵送分层进行,分层厚度 $\leq 400\text{mm}$,振捣间距 $\leq 400\text{mm}$,避免过振漏振。

(2) 养护工艺优化,适配高性能混凝土性能成型要求。底板采用保温保湿养护:覆盖薄膜+保温被,埋设温度传感器实时监控,芯表温差超过 20°C 时启动冷却水管循环。养护周期不少于 14d ,竖向结构拆模后喷涂养护剂并外包薄膜保湿,养护期不少于 14d ^[5]。

3.3 工程应用效果检测分析

(1) 现场实体混凝土力学与耐久性能抽检结果。28d标准养护试件抗压强度均值 60.5MPa ,达设计等级C55的110%。实体钻芯强度推定值 $58.5\sim 62.0\text{MPa}$ 。抗渗等级达P12,300次冻融质量损失率2.3%,相对动弹性模量保持率93.2%,56d电通量均值685C,碳化深度 $\leq 2.5\text{mm}$,指标均满足设计要求。(2) 工程施工质量与成型结构稳定性评价。底板芯部最高温升 63.2°C ,最大温差 14.8°C ,无温度裂缝。结构实体检测合格率100%,垂直度偏差 $\leq 3\text{mm}$,沉降观测累计沉降量 $6.5\sim 9.8\text{mm}$,结构稳定性良好。

3.4 绿色效益与经济效益综合评价

(1) 低碳环保效益,资源节约、碳排放降低效果分析。工程应用混凝土约 3.2万m^3 ,累计消纳工业固废约7360t,节约水泥约7360t,降低 CO_2 排放约6510t,碳排放较常规混凝土降低约36%,节约天然骨料约3840t。(2) 经济效益,施工成本、后期维护成本对比分析。每立方米节约材料费约70元, 3.2万m^3 共节约224万元;裂缝防控节约维修费约72万元,综合节约296万元。耐久性提

升使后期维护成本降低约20%。(3) 社会效益,适配绿色建筑发展标准、推广应用价值。该方案全面满足绿色建筑三星级标准要求,形成成套应用技术体系,已在区域内6个绿色建筑项目中推广应用,具有良好的示范引领价值。

结束语

本文通过试验研究与工程应用,完成了绿色建筑用高性能混凝土配合比的优化设计,确定了兼顾性能、环保与经济的最优配比。该方案有效提升了混凝土结构稳定性,大幅降低工程碳排放与全生命周期成本,实现工业固废资源化利用。研究成果切实解决了绿色建筑大体积构件裂缝、高泵送施工等技术难题,可为同类建筑工程混凝土配比设计与施工应用提供可靠借鉴。

参考文献

- [1]梁卓悦,余波,蔡盛源.基于材料成本与碳排放成本最小化的低碳高性能混凝土配合比优化设计[J].材料导报,2025,39(08):218-225.
- [2]赵文华,孔佳慧,孙琦.绿色低碳超高性能混凝土性能与微观机理评价分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(03):313-322.
- [3]冷勇,余睿,范定强.碳化再生粗骨料环保型超高性能混凝土的制备与配合比优化[J].建筑材料学报,2022,25(11):1185-1189.
- [4]蒋正武,孙振平,王培铭.绿色建筑用高性能混凝土配合比设计与耐久性能调控[J].建筑科学与工程学报,2023,40(02):96-103.
- [5]张博文,陆岩,宋修广.低碱高性能生态混凝土配合比设计与优化[J].河南科学,2025,43(02):207-217.