

基于室内试验的高比例掺合材料混凝土配合比优化设计

王宏玉 王 鑫

温州市交通工程试验检测有限公司 浙江 温州 325000

摘 要：本文围绕基于室内试验的高比例掺合材料混凝土配合比优化设计展开。阐述混凝土配合比设计的理论基础，包括基本组成、性能、设计原则及高比例掺合材料混凝土特点。详细介绍室内试验方法与设计，涵盖试验材料与设备、方案设计及步骤方法。通过单因素与多因素交互作用分析得出优化结果，并探讨了性能提升机理。结合工程案例，分析技术经济性，并提出标准化与推广建议，旨在推动高比例掺合材料混凝土在工程中的广泛应用。

关键词：室内试验；高比例掺合材料；混凝土；配合比优化设计

1 混凝土配合比设计理论基础

混凝土配合比设计理论基础是保障混凝土质量、实现工程结构功能与耐久性的核心依据，其核心在于通过科学计算和试验验证，确定混凝土中各原材料（水泥、水、砂、石、外加剂等）的最优用量比例。这一过程需综合平衡混凝土的力学性能、工作性、耐久性及经济性，以适应不同工程环境及使用要求。力学性能是配合比设计的首要目标，通过调整水灰比、胶凝材料用量等参数，可有效控制混凝土的抗压强度、抗折强度等关键指标。工作性直接影响施工效率与质量，合理的配合比需确保混凝土具备良好的流动性、粘聚性和保水性，以满足泵送、浇筑等工艺需求。这通常通过优化砂率、掺入高效减水剂等措施实现^[1]。耐久性是关键，配合比设计需考虑环境侵蚀（如冻融、碳化、化学腐蚀）对混凝土的影响，通过提高密实度、使用矿物掺合料（如粉煤灰、矿渣）等方式增强抗侵蚀能力。经济性则要求在满足性能要求的前提下，降低原材料成本。通过选用性价比高的材料、优化级配设计等手段，实现资源高效利用。

2 室内试验方法与设计

2.1 试验材料与设备

在进行室内混凝土相关试验时，试验材料与设备的选择是确保试验结果准确性和可靠性的基础。试验材料方面，需严格把控水泥的种类（如硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥等）、强度等级及生产厂家，确保其质量符合国家或行业标准；骨料（包括粗骨料如碎石、卵石和细骨料如河砂、机制砂）需测定粒径分布、含泥量、压碎值等关键指标，以评估其对混凝土性能的影响；水应选用清洁的饮用水，避免因杂质导致试验结果偏差；外加剂（如减水剂、引气剂等）的选择需根据试验目的进行，并严格控制其掺量，以确保外加剂对混凝土性能的

改善效果符合预期。试验设备方面，搅拌机需满足混合混凝土材料的要求，确保搅拌时间、转速等参数符合标准，以保证混凝土的均匀性；振动台用于成型试件，需确保其振动频率和振幅稳定，以保证试件密实度均匀；压力试验机用于测定混凝土的抗压强度，需定期校准以保证测量精度；还需配备天平、量筒、坍落度筒等辅助设备，用于精确测量材料的重量、体积及混凝土的工作性。

2.2 试验方案设计

在设计试验方案时，首先需明确试验目的，如探究不同水泥用量对混凝土强度的影响，或评估外加剂对混凝土工作性的改善效果。接着，需对试验变量进行细致控制，包括自变量（如水泥用量、水胶比、外加剂掺量等）的设定，因变量（如混凝土的抗压强度、坍落度等）的观测，以及控制变量（如骨料种类、搅拌时间、养护条件等）的保持一致。根据变量组合设计试验组，每组需重复多次试验以提高结果的可靠性，例如可设置不同水泥用量的试验组，每组再细分为不同外加剂掺量的子组。同时需设计详细的数据记录表格，包括试验编号、材料用量、观测指标等，以便后续的数据处理和分析。试验结束后，应采用统计方法对数据进行处理和分析，以得出科学结论，并为后续的试验优化提供依据。

2.3 试验步骤与方法

试验步骤与方法需严格按照规范执行，以确保试验过程的规范性和结果的准确性。在试验准备阶段，需按设计要求准备试验材料，并测定其基本性能指标，如水泥的强度等级、骨料的粒径分布等；需检查试验设备是否正常运行，必要时进行校准，以确保试验设备的准确性。在混凝土拌制阶段，需按照配合比设计准确称量材料，采用机械搅拌方式确保混合均匀，并控制搅拌时间，避免过拌或欠拌导致混凝土性能下降。在试件成型

与养护阶段,需将拌制好的混凝土装入模具,在振动台上振动成型,以排除混凝土中的气泡并提高密实度;成型后需及时覆盖并标养(如温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$)至规定龄期,以保证混凝土充分水化并达到设计强度^[2]。在性能测试阶段,需根据试验目的进行相应的性能测试,如使用压力试验机测定抗压强度,记录破坏荷载并计算强度值;采用坍落度筒测定坍落度,观察粘聚性和保水性;根据需要还可开展抗渗性、抗冻性等专项试验。在数据整理与报告阶段,需对试验数据进行整理和分析,绘制图表以直观展示结果;同时需撰写试验报告,包括试验目的、方法、结果及结论,并提出改进建议。在整个试验过程中,需严格遵守安全规范,佩戴防护用品;如遇异常数据(如强度偏低、坍落度异常),需复核试验过程并重新测定;另外,还需定期对试验设备进行维护和校准,以确保其正常运行。

3 高比例掺合材料混凝土配合比优化结果

3.1 单因素影响分析

在高比例掺合材料混凝土配合比优化过程中,单因素影响分析是探究某一特定变量对混凝土性能影响规律的重要步骤。通过固定其他配合比参数,仅改变某一掺合材料(如粉煤灰、矿渣粉、硅灰等)的掺量,系统研究其对混凝土工作性(如坍落度、扩展度)、力学性能(如抗压强度、抗折强度)及耐久性(如抗渗性、抗碳化性)的影响。分析结果表明,随着掺合材料掺量的增加,混凝土的工作性通常呈现先改善后恶化的趋势,而力学性能和耐久性则与掺合材料的种类、细度及活性密切相关。单因素影响分析为后续的多因素交互作用分析及最优配合比确定提供了基础数据支持。

3.2 多因素交互作用分析

多因素交互作用分析是考虑多个掺合材料及其掺量同时变化时,对混凝土性能的综合影响。通过正交试验设计或响应面法等统计方法,研究不同掺合材料之间的协同效应或拮抗作用。分析结果显示,掺合材料之间的交互作用对混凝土性能具有显著影响。例如,粉煤灰与矿渣粉的复合掺入可产生“超叠加效应”,显著提高混凝土的强度和耐久性;而硅灰与减水剂的协同作用则能有效改善混凝土的工作性并减少用水量。多因素交互作用分析还揭示了各掺合材料在最佳掺量范围内的相互作用规律,为进一步优化配合比提供了科学依据。通过综合考虑各掺合材料的性能特点及其交互作用,可实现混凝土性能的最优化配置。

3.3 最优配合比确定

基于单因素影响分析及多因素交互作用分析的结

果,结合工程实际需求(如强度等级、工作性要求、耐久性指标等),通过试配和性能测试,最终确定高比例掺合材料混凝土的最优配合比。最优配合比需满足以下条件:在保证混凝土工作性良好的前提下,实现力学性能和耐久性的最优化;需考虑经济性和施工可行性,确保配合比在实际工程中的可操作性。确定最优配合比后,需进行大规模试制和现场应用验证,以进一步评估其性能稳定性和可靠性。通过不断优化和调整配合比参数,可实现高比例掺合材料混凝土在工程中的广泛应用和推广,为绿色建筑和可持续发展贡献力量。

4 高比例掺合材料混凝土性能提升机理

4.1 微观结构分析

高比例掺合材料混凝土的微观结构显著区别于传统混凝土,其性能提升与微观结构的优化密切相关。掺合材料(如粉煤灰、矿渣粉、硅灰等)的加入,在水泥水化过程中形成了更为致密的微观结构。通过扫描电子显微镜(SEM)等分析手段可观察到,掺合材料颗粒填充水泥基体中的孔隙,减少有害孔的数量,同时增加凝胶孔和毛细孔的连通性优化,使混凝土内部结构更加均匀^[3]。掺合材料与水泥水化产物(如氢氧化钙)发生二次水化反应,生成更多的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,这些凝胶相互交织形成三维网络结构,进一步增强混凝土的密实性和力学性能。微观结构的优化还体现在界面过渡区的改善上,掺合材料的火山灰效应降低界面区的钙矾石含量,减少微裂缝的产生,从而提高了混凝土的抗渗性和耐久性。

4.2 水化反应机理

高比例掺合材料混凝土的水化反应机理复杂且独特,涉及水泥熟料与掺合材料之间的多相反应。在水泥水化初期,水泥熟料中的硅酸三钙(C3S)和硅酸二钙(C2S)迅速水化生成C-S-H凝胶和氢氧化钙(CH),为混凝土提供了早期强度。随着水化反应的进行,掺合材料中的活性成分(如SiO₂、Al₂O₃)开始与水泥水化产生的CH发生二次水化反应,消耗了部分CH并生成额外的C-S-H凝胶。这一过程不仅提高了混凝土的后期强度,还促进混凝土内部微观结构的致密化。同时,掺合材料的微集料效应也发挥了重要作用,其颗粒在水化过程中作为“晶核”促进了水泥水化产物的结晶和生长,进一步加速水化反应的进程。水化反应机理的深入理解有助于揭示高比例掺合材料混凝土性能提升的本质原因,并为配合比优化和性能调控提供理论依据。

4.3 性能提升机制

高比例掺合材料混凝土性能提升的机制是多方面

的,主要包括微观结构优化、水化反应促进以及材料间的协同效应。微观结构优化通过填充孔隙、减少有害孔和增加凝胶孔等手段,显著提高了混凝土的密实性和力学性能。水化反应促进则通过二次水化反应和微集料效应,加速了水泥水化进程并生成了更多的水化产物,从而增强了混凝土的强度和耐久性。掺合材料之间的协同效应也是性能提升的重要因素之一。不同掺合材料在化学组成、物理性能和反应活性上存在差异,它们的复合掺入可以产生“超叠加效应”,即某种掺合材料的优点被另一种掺合材料所放大或补充,从而实现了混凝土性能的整体提升。这些性能提升机制共同作用,使得高比例掺合材料混凝土在强度、工作性、耐久性等方面均表现出优异的性能。

5 高比例掺合材料混凝土配合比优化工程应用

5.1 工程案例

在多个大型基础设施项目中,高比例掺合材料混凝土配合比优化已展现出显著的应用效果。例如,在某跨海大桥的建设中,为满足桥梁结构对混凝土耐久性和强度的严苛要求,项目团队采用高比例粉煤灰与矿渣粉复合掺入的混凝土配合比。通过系统的试验研究与现场应用验证,该配合比不仅有效降低混凝土的水化热,减少温度裂缝的产生,还显著提高混凝土的抗氯离子渗透性能,延长桥梁结构的使用寿命。类似地,在高层建筑和地下空间开发中,高比例掺合材料混凝土的应用也取得良好成效,通过优化配合比,实现混凝土强度与工作性的平衡,同时降低材料成本,提高施工效率。这些工程案例充分证明高比例掺合材料混凝土配合比优化在提升工程质量、保障结构安全方面的有效性和可行性。

5.2 技术经济性分析

从技术经济性角度来看,高比例掺合材料混凝土配合比优化具有显著优势。技术层面,通过精确控制掺合材料的种类、掺量及粒径分布,可实现混凝土性能的定制化设计,满足不同工程对强度、工作性、耐久性的特定需求。掺合材料的火山灰效应和微集料效应有助于改善混凝土内部结构,提高混凝土的密实性和抗渗性,从而延长结构使用寿命。经济层面,高比例掺合材料的应用可显著降低水泥用量,减少原材料成本^[4]。由于掺合材

料多为工业废弃物或副产品,其资源化利用还符合绿色建筑和可持续发展的理念,有助于减少环境污染和生态破坏。综合来看,高比例掺合材料混凝土配合比优化在提升工程质量和经济效益方面均展现出巨大潜力。

5.3 标准化与推广建议

为进一步推动高比例掺合材料混凝土配合比优化的标准化与广泛应用,提出以下建议:首先,应加快制定和完善相关技术标准和规范,明确掺合材料的种类、质量要求、掺量范围及试验方法,为工程应用提供科学依据。其次,加强产学研用合作,推动技术创新与成果转化,提升高比例掺合材料混凝土的性能稳定性和可靠性。同时加强技术培训和宣传推广,提高工程技术人员对高比例掺合材料混凝土的认识和应用能力。另外,还应建立健全的质量监管体系,加强对原材料、生产过程及成品质量的监督检验,确保工程质量安全。通过这些措施的实施,有望推动高比例掺合材料混凝土在更多领域和更大范围内得到应用,为绿色建筑和可持续发展贡献力量。

结束语

本文通过系统的室内试验与理论分析,深入探讨了高比例掺合材料混凝土配合比优化设计的各个方面。研究表明,合理优化配合比可显著提升混凝土的性能,并带来显著的技术经济优势。未来,应继续加强相关研究,完善技术标准和规范,推动产学研用深度融合,同时加强技术培训和宣传推广,提高工程技术人员对高比例掺合材料混凝土的认识和应用能力,共同推动绿色建筑和可持续发展的进程。

参考文献

- [1]董方园,郑山锁,宋明辰,张艺欣,郑捷,秦卿.高性能混凝土研究进展 I:原材料和配合比设计方法[J].材料导报,2020,32(01):159-166.
- [2]张业盛,金立兵,段杰,等.再生混凝土的配合比设计研究综述[J].工程建设,2024,56(03):1-5.
- [3]陈海棠.超高性能混凝土配合比优化设计研究[J].广东建材,2024,40(03):27-29.
- [4]郑巍,李厚波,王懿晟,等.超长底板混凝土配合比设计与跳仓法有限元分析[J].建筑施工,2024,46(02):164-168.