

固废混凝土掺合料的技术与经济性能综合分析

石杰光¹ 赵方群² 韩卫卫^{3*}

1 河南省公路工程局集团有限公司

2 河南交投沈遂高速公路有限公司

3 河南财经政法大学

DOI:10.32629/bd.v9i7.4471

[摘要] 伴随着建筑行业绿色转型和资源循环利用战略的推进,固废混凝土掺合料作为替代传统水泥的重要材料,其技术可行性以及经济合理性也成了行业关注的焦点。本文系统地分析了粉煤灰、矿渣粉、钢渣粉等典型固废掺合料的物理力学性能、耐久性能等技术指标,揭示了技术性能和经济性能的协同关系,提出优化应用的途径建议,为固废混凝土掺合料的规模化应用提供理论和实践参考。

[关键词] 固废混凝土; 掺合料; 技术性能; 经济性能; 资源循环

中图分类号: TV331 文献标识码: A

Comprehensive Analysis of the Technical and Economic Performance of Solid Waste Concrete Admixtures

Jieguang Shi¹ Fangqun Zhao² Weiwei Han^{3*}

1 Henan Provincial Highway Engineering Bureau Group Co., Ltd

2 Henan Jiaotong Shen Su Expressway Co., Ltd

3 Henan University of Economics and Law

[Abstract] With the green transformation of the construction industry and the promotion of the resource recycling strategy, solid waste concrete admixtures, as an important alternative to traditional cement, have become the focus of industry attention due to their technical feasibility and economic rationality. This paper systematically analyzes the physical and mechanical properties, durability performance, and other technical indicators of typical solid waste admixtures such as fly ash, slag powder, and steel slag powder, reveals the synergy relationship between technical performance and economic performance, and proposes suggestions for optimizing application, providing theoretical and practical references for the large-scale application of solid waste concrete admixtures.

[Key words] Solid Waste Concrete; Admixtures; Technical Performance; Economic Performance; Resource Recycling

混凝土作为全球用量最大的建筑材料,其生产消耗大量水泥,水泥制造业属于高能耗、高碳排放的重点行业,同时工业生产和城市建设过程中产生的粉煤灰、矿渣、钢渣等固体废弃物累计堆存量巨大,不仅占用土地资源,而且容易造成环境污染问题。固废混凝土掺合料把工业固废经过加工处理后掺入混凝土,实现了以废代材,降低水泥用量、减少碳排放,化解固废处置压力,符合“双碳”目标和绿色建筑发展要求。

1 固废混凝土掺合料的类型与加工工艺

1.1 主要类型及来源

目前工程中应用最广泛的固废混凝土掺合料主要有三大类,一是火电、钢铁行业副产品,如粉煤灰、粒化高炉矿渣;二是工业废渣加工品,如钢渣粉、磷渣粉;三是城市固体废弃物再生料,

如建筑垃圾再生微粉,其中粉煤灰、矿渣粉因产量大、性能稳定,占固废掺合料市场主导地位。

1.2 加工工艺要求

固废掺合料的加工要满足混凝土性能适配性的要求,主要工艺有预处理、破碎、研磨、分级等。粉煤灰要经过除铁、除杂预处理,去除颗粒中的金属杂质和大块硬块;矿渣粉要先经过干燥处理,含水率控制在1%以下,再用球磨机研磨到比表面积400-500m²/kg,保证活性的发挥。加工时必须严格控制颗粒级配,一般要求0.075mm方孔筛筛余率不超过10%,还要通过物理激发或者化学激发来提高其火山灰活性,保证与水泥水化产物的协同作用效果。

2 固废混凝土掺合料的技术性能分析

2.1 物理力学性能

第一,工作性改善作用,固废掺合料的颗粒形态、级配对接混凝土工作性影响较大。粉煤灰颗粒多为球形玻璃体,比表面积小,掺入混凝土后能发挥滚珠效应,减小骨料间的摩擦阻力,同时其需水量比低于水泥,可降低混凝土单位用水量,提高流动性、黏聚性。试验发现掺入30%的I级粉煤灰后,混凝土的坍落度可增加20mm~30mm,扩展度提高15%~20%,并且泌水率减少10%~15%^[1]。

第二,强度发展规律:固废掺合料的强度贡献主要是通过火山灰反应,即掺合料中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)等凝胶物质,从而提高混凝土的强度。但不同掺合料的强度发展速率不同:矿渣粉早期强度发展较快,掺入20%~40%矿渣粉的混凝土,7d强度可达基准混凝土的85%~95%,28d强度与基准混凝土相当甚至高出5%~10%;粉煤灰早期强度贡献较小,3d强度仅为基准混凝土的70%~80%,但后期强度增长显著,90d强度可超过基准混凝土10%~15%。掺合料掺量要合理控制,掺量过多(超过50%)会造成早期强度不足,一般建议粉煤灰掺量为20%~40%,矿渣粉掺量为30%~50%。

2.2 耐久性性能提升

第一,抗渗性提高,固废掺合料的火山灰反应和微集料效应可以改善混凝土内部孔结构,减少毛细孔隙的数量,减小孔隙的尺寸,提高混凝土的密实度。从试验数据可知,掺入30%粉煤灰+20%矿渣粉的复合掺合料混凝土抗渗等级由P8提高到P12以上,渗透系数降低60%~70%。

第二,抗冻性改善,由于密实度提高、孔隙结构改善,混凝土抗冻性明显提高。在严寒地区,掺入25%~35%矿渣粉的混凝土,经过200次冻融循环后,质量损失率小于5%,强度损失率小于20%,满足严寒地区工程要求;粉煤灰掺合料通过改善混凝土的含气量和气泡结构,提高抗冻融能力,在适宜掺量下抗冻等级可达F200以上。

第三,抗侵蚀性提高,固废掺合料可以降低混凝土内部的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,减少硫酸盐、氯盐等侵蚀介质与水泥水化产物的反应,密实的孔结构可以阻止侵蚀介质的渗透。在硫酸盐侵蚀环境中,掺入40%矿渣粉的混凝土,56d硫酸盐侵蚀系数可以达到0.9以上,明显优于基准混凝土;在氯盐环境中,掺入粉煤灰可以降低混凝土的氯离子扩散系数,延缓钢筋锈蚀。

3 固废混凝土掺合料的经济性能分析

3.1 直接成本控制

3.1.1 原材料成本节约

粉煤灰掺量限制:常规掺量20%~30%,过高会降低混凝土早期强度,需配合其他掺合料使用;低掺量下性价比高,但需平衡运输成本与性能需求。渣微粉掺量可达50%~70%,提升混凝土后期强度、抗渗性和耐久性,减少水泥用量,长期节省成本。以C30混凝土为例,掺入30%粉煤灰+20%矿渣粉的复合掺合料,可替代50%的水泥用量,按每立方米混凝土水泥用量300kg计算,每

立方米混凝土原材料成本可降低40~60元,降幅达8%~12%^[2]。

3.1.2 施工成本降低

固废掺合料改善混凝土工作性,减少振捣时间,提高施工效率;混凝土泌水率降低、收缩减小,减少裂缝修补费用。某住宅项目的混凝土采用粉煤灰和矿渣粉混合掺合料,施工效率提高了10%~15%,裂缝修补成本降低30%~40%。

3.2 资源与环境效益

工业固废资源化利用减少天然资源消耗,粉煤灰、矿渣等掺合料每年可以替代数千万吨水泥,节约大量石灰石、粘土等矿产资源。每利用1吨粉煤灰可节约0.8吨石灰石、0.3吨标准煤;每利用1吨矿渣粉可节约0.7吨水泥,减少矿产资源开采量约1.2吨。水泥生产中每吨大约排放0.8吨二氧化碳,固废掺合料替代水泥能够明显降低碳排放。研究表明,掺入40%固废掺合料的混凝土每立方米碳排放量可以减少100~150kg,减少幅度达到30%~40%。固废堆存还会引起扬尘、土壤污染等问题,掺合料的利用可以减少固废堆存量,降低处置成本,每利用1吨固废可以节约堆存费用20~50元。

3.3 长期经济效益

固废掺合料混凝土由于长期耐久性得到提高,可以延长建筑物的使用寿命,减少维修、翻新费用。在桥梁工程中,用普通混凝土建造的桥梁使用寿命约为50年,而用矿渣粉、粉煤灰复合掺合料混凝土建造的桥梁使用寿命可延长至80年以上,维修费用可减少60%~70%。同时随着固废掺合料技术的成熟以及规模化应用,固废掺合料的加工成本不断下降,部分地方还出台了固废利用补贴政策(每吨补贴50~100元),使固废利用的经济性进一步提高^[3]。

4 技术与经济性能的协同关联及优化建议

4.1 协同关联分析

固废掺合料的技术性能和经济性能存在着明显的正相关协同效应,技术性能的提高(如强度提高、耐久性提高)可以延长工程使用寿命,降低长期维护成本,提高经济性能;经济性能的改善可以促进掺合料的规模化应用,给技术研发和性能改良提供资金支持。高性能矿渣粉虽然加工成本略高,但是技术性能更好,可以替代更多水泥,并且显著提高混凝土的耐久性,长期经济效益更好;而低性能固废掺合料虽然短期成本低,但是会导致混凝土强度不足、耐久性差,增加后期维修成本,总体经济效益差。

4.2 优化应用建议

技术优化方面,一是推广复合掺合料的应用,采用粉煤灰与矿渣粉、钢渣粉与磷渣粉等不同的掺合料复配,发挥协同效应,弥补单一掺合料的性能缺陷,如粉煤灰的低需水量与矿渣粉的高早期强度相结合,可实现混凝土工作性与强度的平衡;二是加强掺合料改性技术研发,采用化学激发剂(氢氧化钠、硫酸钠)或物理-化学复合激发方式,提高低活性固废掺合料的性能,扩大固废利用范围;三是建立个性化配比设计体系,根据工程所处环境、强度等级、施工要求等,针对性调整掺合料类型、掺量、外加剂适配性,保证技术性能达标^[4]。

经济与政策方面,一是健全固废资源化激励政策,扩大固废掺合料补贴范围,提高补贴标准,对使用固废掺合料的绿色建筑项目实行税收减免、信贷支持等优惠政策;二是优化产业链布局,推动水泥企业与火电、钢铁企业合作,建立固废掺合料加工基地,降低运输成本,就地取材;三是健全成本核算体系,把环境成本(碳排放、固废堆存污染)纳入混凝土成本核算,体现固废掺合料的环境经济效益,引导市场选择。

5 结论

固废混凝土掺合料依靠技术性能的改善和经济性能加强,达成资源循环利用和建筑行业绿色发展双丰收。从技术上讲,不但可以改善混凝土的工作性、提高强度和耐久性,而且可以降低水化热和收缩开裂的风险,满足各种工程场景下的性能要求;从经济上讲,它通过替代水泥降低直接成本,通过资源循环和污染减排创造环境效益,通过耐久性提高节约长期维护费用,具有明显的经济竞争力。

[基金项目]

(1)本文系横向课题《赤泥-粉煤灰-脱硫石膏胶凝材料体系设计及其用作道路基层的性能研究》(项目编号20230022);(2)河南省2026年度一般人文社科项目《“师-生-机”三元交互教学模式赋能学为中心教学范式改革研究》项目编号2026-ZDJH

-462。

[参考文献]

- [1]袁宇鹏,罗振,任小坤,等.锂渣基复合掺合料的制备及在混凝土中的应用[J].四川建材,2025,51(12):24-27.
- [2]明阳,任昊,李玲,等.固废基超高性能混凝土制备与性能研究[J].功能材料,2025,56(09):9163-9170.
- [3]林新.多源固废混凝土掺合料的技术与经济性能分析[J].内蒙古科技与经济,2025,(16):131-134.
- [4]李航,林喜华.基于多元固废制备超细矿物掺合料及在C60混凝土中的性能研究[J].江西建材,2024,(S1):78-81+105.

作者简介:

石杰光(1990--),男,汉族,河南洛阳人,本科,中级工程师,河南省公路工程局集团有限公司,研究方向:公路工程。

赵方群(1993--),女,汉族,河南商丘人,大学本科,助理工程师,河南交投沈遂高速公路有限公司,研究方向:建设工程施工与管理。

*通讯作者:

韩卫卫(1986--),男,汉族,河南平顶山人,博士研究生,中级讲师,河南财经政法大学,研究方向:新型水泥基材料、土木工程材料。