

粉煤灰掺量对混凝土强度及抗渗性能检测试验研究

张伟

泰州市天衡建设工程质量检测有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i12.5169

[摘要] 为探究固废粉煤灰在混凝土工程中的合理应用方式,本文围绕粉煤灰掺量对混凝土性能的作用规律展开试验研究,设置0%到40%的多组掺量梯度,采用等质量替代水泥的方式制作试件并完成标准养护,测试了不同养护龄期试件的抗压强度与抗渗能力。试验结果显示,粉煤灰掺量增加会小幅降低混凝土早期强度,但能够改善其后期强度和抗渗性能,综合各项指标判断,10%~20%为合适掺量范围,其中20%为最优掺量。

[关键词] 粉煤灰; 混凝土; 掺量; 抗压强度; 抗渗性能; 检测试验研究

中图分类号: TU528.041 文献标识码: A

Experimental Study on the Effects of Fly Ash Content on Concrete Strength and Permeability Resistance

Wei Zhang

Taizhou Tianheng Construction Engineering Quality Testing Co., Ltd.

[Abstract] To investigate the appropriate application of solid waste fly ash in concrete engineering, this paper conducts an experimental study on the effects of fly ash content on concrete performance. Multiple fly ash replacement levels ranging from 0% to 40% were set, and specimens were prepared by replacing cement with an equal mass of fly ash and subjected to standard curing. The compressive strength and permeability resistance of specimens at different curing ages were tested. The experimental results show that increasing the fly ash content slightly reduces the early-age strength of concrete but improves its later-age strength and permeability resistance. Based on a comprehensive evaluation of the various performance indicators, a fly ash content of 10%–20% is considered appropriate, with 20% identified as the optimal content.

[Key words] fly ash; concrete; replacement content; compressive strength; permeability resistance; experimental study

引言

粉煤灰是工业生产过程中产生的固体废料,对其进行回收利用,能够在一定程度上节约建筑原材料,也能有效减少工程施工的经济投入,在现代绿色混凝土施工中具备较高的应用价值。为明确粉煤灰掺量变化对混凝土实际性能带来的具体影响,本文设置多组掺量梯度开展对照试验,检测不同养护周期下混凝土试件的强度与抗渗表现,以此筛选适配工程应用的最优掺量,为粉煤灰混凝土的现场应用提供基础的试验依据与理论参考。

1 试验原材料与试验方案

1.1 试验原材料

本次试验选用P.042.5普通硅酸盐水泥,材料各项指标均符合国家现行规范标准,水泥整体细度均匀,凝结时间与安定性指标合格,28天力学性能能够满足混凝土配制的基础要求。试验所

用粉煤灰为I级粉煤灰,材料质地均匀无结块,主要化学组分含量及烧失量、含水率、细度等指标均达标,具备良好的火山灰活性,可参与水泥水化二次反应。试验粗骨料采用5至25mm连续级配碎石,骨料质地坚硬、杂质含量少,各项质量指标符合试验标准,能够稳定支撑混凝土骨架结构,细骨料选用细度模数2.6至2.8的天然河砂,颗粒级配连续,含泥量指标合格,可有效提升混凝土拌和物密实程度^[1]。试验拌合用水采用洁净自来水,水质满足混凝土拌合规范要求,搭配使用的聚羧酸高效减水剂适配性较好,能够优化拌和物流动性能,可统一各组试验混凝土的工作性能,规避性能差异对试验结果造成的干扰。

1.2 试验配合比设计

本次试验为精准探究粉煤灰掺量对混凝土性能的影响规律,采取粉煤灰等质量替换水泥的方式设计试验配合比,试验一共设置五组梯度掺量,分别设置0%、10%、20%、30%、40%的粉煤灰

替代比例,未掺粉煤灰的组别作为空白对照组用于数据对比。试验过程中会统一控制基础配比参数,将混凝土水胶比固定为0.42,砂率统一设置为35%,同时固定拌合用水与砂石骨料的用量。为消除拌合物工作性能差异对试验结果的干扰,试验人员会适当微调减水剂掺量,让所有试验组的拌和物坍落度保持一致。整套试验严格遵循单一变量原则,只改变粉煤灰与水泥的配比参数,能够最大程度减少试验误差,让最终的试验检测数据具备真实性与参考价值。

1.3 试件制备与养护

试验人员会依照既定配合比精准称量各类原材料,再利用强制式搅拌机完成混凝土物料的搅拌作业。搅拌工序分为两个阶段开展,先把砂石骨料、水泥和粉煤灰充分干拌半分钟,让固体物料初步混合均匀,随后投入拌合用水与减水剂持续搅拌一分半钟,能够有效避免拌合料出现离析、泌水等问题。试验过程会采用两种规格模具分别制作试件,立方体模具用于抗压试验试件成型,圆台模具则用来制备抗渗试件,浇筑完成后通过振动台振捣密实,静置二十四小时后统一脱模。所有成型试件都会送入标准养护室统一养护,养护环境温度稳定控制在 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$,空气相对湿度不低于95%,待试件养护至规定龄期后,便可取出开展各项性能检测试验。

1.4 试验检测方法

本次试验主要围绕混凝土力学强度与抗渗耐久性性能开展测试工作,所有操作流程均严格依照国内现行混凝土试验标准执行。混凝土抗压强度的测试工作会借助压力试验机完成,试验会选取养护时长为3d、7d、28d和60d的立方体试件进行检测,试验过程中会匀速控制设备加载速率,每组试验均配备三组平行试件,测试完成后剔除偏差较大的数据,再通过计算均值的方式记录结果,以此总结混凝土强度随养护时间变化的规律。混凝土抗渗性能则采用分级加压的方式检测,试验针对28d与60d养护龄期的试件持续施加水压,记录试件出现渗水现象时的最大压力数值,再换算得出对应的抗渗等级,能够直观对比不同粉煤灰掺量对混凝土抗渗能力造成的性能差异。

2 试验结果与性能影响规律分析

2.1 粉煤灰掺量对混凝土早期抗压强度的影响

整理混凝土养护3d、7d的早期抗压强度试验数据后,能够清晰看出粉煤灰掺量高低会直接干预混凝土的早期力学性能,整体强度数值会随着粉煤灰替代比例的提高而逐步降低。当粉煤灰掺量维持在10%至20%的区间时,混凝土早期强度的下降幅度相对有限,整体力学性能依旧可以满足建筑工程前期施工的承载需求,不会对基础施工工序造成不利影响。如果将粉煤灰掺量提升至30%乃至40%,混凝土的早期抗压强度就会发生大幅下降。出现这种性能变化的核心原因,是粉煤灰本身的水化活性释放速度偏慢,在混凝土养护初期难以生成足量的胶凝物质,再加上水泥用量被大幅替代,整体水化产物的生成量显著减少,使得混凝土内部骨料粘结结构不够密实,结构成型质量较差,最终就造成了混凝土早期整体力学强度大幅弱化的现象。

2.2 粉煤灰掺量对混凝土后期抗压强度的影响

通过统计试件养护28天与60天的抗压强度试验数据能够发现,粉煤灰的掺入,其实会对混凝土后期的强度发展产生持续的作用效果,这类掺粉煤灰的混凝土大多存在后期强度稳步提升的特性,能够有效弥补自身早期强度不足的问题^[2]。在本次试验设置的几组掺量梯度里,掺量为10%和20%的混凝土试件,经过28天标准养护后的强度数值,基本可以和未掺粉煤灰的基准混凝土持平,养护周期延长至60天时,试件强度还会出现稳步提升的现象,其中20%掺量的试件强度增长效果是所有组别里最优异的。30%掺量的混凝土试件,它的后期强度虽然依旧略低于基准试件,但二者之间的性能差值已经出现明显缩减。而40%高掺量的试件很难实现有效的后期强度增长,整体性能始终达不到工程应用标准,这也充分说明粉煤灰的掺加比例存在合理区间,一旦超出适用范围,就会明显限制混凝土后期强度的正常发育。

2.3 粉煤灰掺量对混凝土抗渗性能的影响

混凝土的抗渗能力能够直观体现出自身密实程度与内部孔隙结构的好坏,也是衡量混凝土整体耐久性的重要指标。从本次试验得出的相关数据能够看出,混凝土抗渗性能会随着粉煤灰掺量的改变出现规律性变化,整体呈现先变好后变差的趋势。未添加粉煤灰的普通混凝土内部孔隙数量较多,存在不少贯通性毛细孔,水分很容易渗入构件内部,抗渗表现相对一般。当粉煤灰掺量控制在10%至20%的范围时,混凝土抗渗性能可以得到有效改善,其中20%掺量的试件抗渗效果最为突出,这是因为粉煤灰颗粒可以填充混凝土内部的细小孔隙,再加上后期水化反应生成的胶凝物质能够进一步密实结构,有效阻挡水分渗透。如果粉煤灰掺量超过30%,混凝土抗渗性能就会逐步衰减,过高的粉煤灰占比会减少水泥用量,让混凝土早期结构较为松散,产生较多孔隙缺陷,即便后期持续水化,也难以修复结构问题,最终造成抗渗性能明显下降。

2.4 粉煤灰掺量对混凝土综合性能的适配性分析

结合本次试验测出的混凝土早后期强度与抗渗性能各项指标来看,粉煤灰掺入比例的不同,会让混凝土整体使用性能产生不一样的变化效果,各掺量组别表现出的综合适配效果有着较为明显的区别。对比全部试验配比能够看出,20%粉煤灰掺量的整体适配效果是所有组别里最好的,该配比混凝土的早期强度下降幅度较小,不会对现场施工进度造成明显影响,试件后期强度增长状态稳定,同时抗渗耐久性能也能达到最优状态。10%掺量的混凝土虽然可以满足工程基本使用要求,但其对混凝土结构性能的改善效果并不突出,粉煤灰固废资源化的利用效率也相对偏低^[3]。30%掺量属于工程可用的临界配比,试件各项性能刚好达到规范标准,但结构整体稳定性相对薄弱。40%及更高比例的粉煤灰掺入会严重削弱混凝土各项核心性能,无法满足工程建设的基本标准,因此并不适用于实际工程项目的施工应用。

3 作用机理与研究结论展望

3.1 粉煤灰改性混凝土微观作用机理

粉煤灰能够优化混凝土各项性能,主要依托三种核心作用机制共同实现。首先是形态优化作用,粉煤灰大多为细小的球形颗粒,掺入混凝土拌合物内部以后,可以有效降低固体颗粒之间的摩擦阻力,优化整体颗粒搭配效果,让拌合物更加密实,从成型阶段就减少内部空洞缺陷的产生。其次是微集料填充作用,粉煤灰颗粒整体尺寸更小,能够填补水泥水化后产生的各类微小孔隙,细化混凝土内部的孔径结构,减少贯通孔隙的数量,有效阻断水分渗透路径,切实提升混凝土密实性与抗渗能力。最后是火山灰活性作用,粉煤灰内部的活性氧化物可以和水泥水化产生的氢氧化钙发生二次反应,持续生成胶凝物质,这类反应大多发生在养护后期,能够不断修补混凝土内部微缺陷,优化界面结构,稳步提升混凝土后期强度与整体耐久性能。

3.2 试验研究结论

通过本次系统的试验分析可以得出几项核心结论,混凝土的早期强度会随着粉煤灰掺量的不断增加而出现下降,百分之十至百分之二十的低掺量比例对早期强度影响偏小,能够满足现场施工需要,而三成以上的高掺比例会明显削弱混凝土早期力学性能。粉煤灰对混凝土强度的提升作用更多体现在养护后期,存在较为明显的滞后强化效果,百分之二十掺量的试件后期强度表现最好,过高掺量则会因为胶凝活性不足导致强度不达标^[4]。粉煤灰掺量变化也会让混凝土抗渗性能呈现先优后劣的变化趋势,综合各项性能来看,工程中较为合适的粉煤灰掺量区间为百分之十至百分之二十,其中百分之二十为最佳配比。

3.3 研究不足

整个试验过程都是在固定水胶比和标准养护环境下完成,相关试验数据与分析结论只能对应单一试验工况,无法适配复杂多变的实际工程场景。各类环境因素和配比参数的协同影响效果没有得到充分探究,不同温度、湿度养护条件以及水胶比参数变化带来的性能差异还有待进一步验证。试验只针对混凝土强度和抗渗两项指标展开测试,并未系统分析粉煤灰掺量对混凝土抗冻、抗腐蚀、抗碳化等其他耐久特性的作用规律。试验选用的粉煤灰品类也较为单一,没有结合不同细度、不同品质的粉煤灰开展对照试验,整体研究维度不够全面,存在一定的研究局限。

3.4 未来展望

后续相关研究可以从多个角度进一步完善粉煤灰混凝土的相关试验内容,研究人员能够调整试验变量条件,分析不同水胶比、养护环境以及粉煤灰品质对混凝土使用性能的影响,逐步完善这类改性混凝土的适用工况体系^[5]。研究工作也可以结合多种矿物掺合料开展复合试验,探究粉煤灰搭配矿粉、硅灰等材料的协同改性作用,以此提升混凝土的整体使用性能。除此之外,微观检测技术也可以应用在后续试验当中,借助扫描电镜、X射线衍射等设备观察混凝土内部结构变化,能够更加清晰地梳理粉煤灰的改性机理,可为粉煤灰混凝土的工程推广和精细化应用提供可靠依据,助力建筑垃圾固废回收和绿色建材行业的稳步发展。

4 结束语

综上所述,将粉煤灰合理掺入混凝土当中,不仅能够实现工业固废的资源化回收利用,也能在一定程度上控制工程建设成本,对混凝土后期强度和抗渗性能也有不错的优化效果。施工过程中只要合理控制粉煤灰掺量,就可以兼顾混凝土施工质量与长期使用性能,契合绿色建筑的发展理念。后续研究可以逐步丰富试验条件与掺合料搭配形式,不断完善粉煤灰混凝土的应用体系,为绿色建材的工程推广提供一定参考。

【参考文献】

- [1]武文斌,王日强.大掺量粉煤灰混凝土力学性能及耐久性研究[J].水利科学与寒区工程,2026,9(1):26-29.
- [2]张建军.粉煤灰掺量对桥梁高性能混凝土强度和耐久性影响试验研究[J].交通节能与环保,2025,21(3):230-234.
- [3]陈丽.大掺量粉煤灰混凝土回弹强度的影响机制及检测优化研究[J].广东建材,2026,42(2):63-66.
- [4]张兴龙.高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J].粉煤灰综合利用,2025,39(2):49-53.
- [5]许鸿雁,马光花.粉煤灰掺量对市政道路高强混凝土性能的影响测试研究[J].现代工程科技,2025,4(19):61-64.

作者简介:

张伟(1988—),男,汉族,江苏人,大专,工程师,研究方向:工程检测。