

粉煤灰混凝土筏板基础损伤特性研究

Study on Damage Characteristics of Fly Ash Concrete Raft Foundation

吴磊

(福州市江南智慧城市建设运营有限公司, 福州 350000)

摘要: 为明确混凝土材料损伤演变过程, 揭示损伤内在机制, 研究粉煤灰混凝土筏板基础损伤特性。粉煤灰按比例取代水泥, 制备出粉煤灰混凝土, 并测试粉煤灰用量对裂缝损伤特性的影响, 分析不同环境下损伤度以及强度损伤变化。结果表明: 增加粉煤灰掺量可延长首条裂缝出现时间, 裂缝宽度与面积随掺量增加呈下降趋势, 当粉煤灰掺量达到 150 kg/cm^3 时, 其裂缝损伤抑制效果最佳, 且强度保持较好。因此证明, 合理控制粉煤灰掺量可有效改善粉煤灰混凝土筏板基础的抗裂性能与耐久性, 为实际工程应用提供重要参考。

关键词: 高层建筑; 筏板基础; 粉煤灰; 混凝土; 损伤特性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0024-04

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.005

WU Lei

(Fuzhou Jiangnan Smart City Construction and Operation Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

Abstract: To clarify the damage evolution process of concrete materials and reveal the inherent mechanism of damage, the damage characteristics of fly ash concrete raft foundation were studied. Fly ash was used to replace cement in proportion to prepare fly ash concrete, and the influence of fly ash content on crack damage characteristics was tested. The damage degree and strength damage changes under different environments were analyzed. The results showed that an increase in fly ash content could prolong the time for the first crack to appear, and the crack width and area decreased with increasing content. When the fly ash content reached 150 kg , the crack damage suppression effect was optimal, and the strength remained good. Therefore, it is proven that reasonably controlling the fly ash content can effectively improve the crack resistance and durability of fly ash concrete raft foundation, providing an important reference for practical engineering applications.

Key words: high-rise buildings; raft foundation; fly ash; concrete; damage characteristics

0 引言

混凝土作为筏板基础的主要材料, 其裂缝产生与发展、强度劣化等损伤特性, 会通过材料性衰减和结构完整性破坏降低基础的耐久性和使用寿命^[1-2]。因此, 研究混凝土筏板基础的损伤特性, 探寻有效改善其性能的方法, 具有重要的现实意义。

考虑到粉煤灰的特性与制备混凝土时需要关注的难点, 诸多学者作出研究分析。陈志华等^[3]借助三点弯曲试验、单轴拉伸试验等手段, 探究在不同粉煤灰掺量条件下, 混凝土力学性能达到最优时的具体掺量参数; 李永靖等^[4]研究粉煤灰混凝土中掺入碳纳米管后的变形特性, 并确定碳纳米管的用量为 0.13% , 粉煤灰取代水泥的掺量为 70.57% 时, 其抗变形能力最佳; 王茜等^[5]使用支持向量机预测模型分析粉煤灰混凝土的强度, 并通过试验确定该预

作者简介: 吴磊 (1975—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 工程技术与建设管理。

收稿日期: 2025-05-19

测模型的准确性较高；蒋建华等^[6]使用二氧化硅添加到粉煤灰混凝土之中，分析改性后混凝土的力学性能与吸水特性变化，通过分析发现适量添加二氧化硅能够有效提升混凝土的各项性能；高新等^[7]采用大掺量粉煤灰复合高分子聚合物改性剂的技术路线，成功制备出具有良好抗分散性的水下浇筑专用混凝土；邵善庆等^[8]研究了不同碱激发剂掺量下，粉煤灰混凝土在冻融与硫酸盐耦合作用中的质量、超声波波速及抗压强度损失规律；付振博等^[9]探讨了碱激发矿渣-粉煤灰净浆干燥收缩与失水率的关系，以及粉煤灰含量对混凝土抗压强度、反应产物、微观结构和水化热的影响；夏群等^[10]分析了复杂冻融环境下，粉煤灰掺量对直通孔型再生透水混凝土抗盐冻和透水性能的作用；文安飞等^[11]以0.26和0.28为活性粉末混凝土基础水胶比，用再生细集料替代石英砂，研究了粉煤灰掺量对RPC强度的影响；莫黎等^[12]通过粉煤灰混凝土冻融循环和单轴压缩—声发射试验，研究了不同养护制度下其冻损受压损伤演化规律；张玉栋等^[13]以不同比例再生骨料和粉煤灰替代天然材料，制作了粉煤灰再生混凝土，并探究了其力学性能；杨振华等^[14]以粉煤灰等为原料，研究了高温下粉煤灰再生混凝土的损伤演化与特性；柴石玉等^[15]基于前期碱激发粉煤灰矿粉固化土研究成果，试验分析了干湿冻融循环对改良土力学性能的影响及物理机理。

在上述研究的基础上，开展粉煤灰混凝土筏板基础粉损损伤特性研究。研究粉煤灰混凝土筏板基础在不同工况、不同粉煤灰掺量等因素耦合作用下的损伤特性，分析裂缝产生与发展的动态过程以及强度退化规律。同时，结合实际工程应用场景，有针对性地提出改善粉煤灰混凝土筏板基础性能的方法，为实际工程中粉煤灰混凝土筏板基础的设计、施工和维护提供技术支持。

1 试验方法

1.1 试验材料与设备

水泥：密度为600 kg/m³，抗压强度7.5 MPa，具有低断裂伸长率（0.05%）和高吸声系数（9.9），软化系数>0.7；粉煤灰：盐酸可溶率为1%，吸附率10%~20%，烧失量<7.5%，杂质含量<0.01%；粗骨料：粒径5~40 mm，导热系数0.32 W/(m·K)，

耐温性达1 300 ℃，耐压强度50 MPa；细骨料：细度模数2.6，表观密度2 600 kg/m³，坚固性指标90%，含泥量0.1%，含水率<0.5%；减水剂：pH值6~8，含水率<5%，固含量9%；膨胀剂：发气量230 mL/g，分解温度220 ℃，适用孔径32~34 mm，孔距限制<20 cm。水泥、粉煤灰主要化学成分见表1。

表1 水泥、粉煤灰主要化学成分

Table 1 Main chemical components of cement and fly ash /%							
材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O
水泥	64.24	22.46	4.58	3.48			
粉煤灰		56.81	33.88	4.53	1.76	0.34	1.65

1.2 粉煤灰混凝土制备

制备初期，先将水泥和粉煤灰倒入搅拌机中干拌3 min，将各个材料完全混合。完成干拌以后，将水与各个外加剂倒入搅拌机中，搅拌均匀，混合后获得粉煤灰混凝土。其中水为150 kg/m³，粗骨料为1 175 kg/m³，细骨料为747 kg/m³，其余参数配比设计见表2。

表2 混凝土相关参数配比

Table 2 Concrete related parameter ratio / (kg/m ³)		
试件序号	粉煤灰	水泥
试件-A		450
试件-B	50	400
试件-C	100	350
试件-D	150	300
试件-E	200	250
试件-F	250	200

依据GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》，制备的试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm立方体。模具比例严格按照标准要求，采用1:1:1等比例钢模。试件成型后按GB 50204—2023《混凝土结构工程施工质量验收规范》覆盖塑料薄膜，于(20±5)℃环境静置防蒸发；(24±2) h后拆模，立即移入标准养护室，其温度为(20±2)℃、相对湿度≥95%，养护至28 d。养护期间试件按标准间隔10~20 mm放置，保持表面湿润，确保湿度均匀。以此为基础，开展后续测试并完成性能分析。

2 结果分析

2.1 粉煤灰掺量对裂缝损伤特性影响

由表3可知，粉煤灰掺量增加会延缓第一条裂缝出现时间，同时降低裂缝的宽度和面积。综合分析发现，当粉煤灰掺量为0~50 kg时，试验样品的裂

材料科学

缝宽度与面积下降趋势相对较缓。在粉煤灰掺量增加至 150 kg/cm³ 后, 试验样品的裂缝宽度与面积出现明显下降。

粉煤灰替代水泥可降低混凝土水化热, 其作用机理包括: 通过减少水泥用量直接降低放热量; 火山灰反应速率较慢, 延缓热量释放; 微集料效应填充孔隙, 提高密实度。这些综合作用可有效减少温度应力裂缝。同时, 粉煤灰的缓凝作用会延长初凝时间, 为水化反应提供更充分条件。但是如果在混凝土中大量使用粉煤灰, 会导致粉煤灰的胶结性降低, 导致混凝土裂缝损伤抑制效果不佳。经过分析发现, 粉煤灰在混凝土中的掺量为 150 kg/m³ 时, 裂缝损伤抑制效果最好, 即试件 - D 裂缝损伤抑制效果更佳。

表 3 试件第一条裂缝情况

Table 3 The first crack condition of the specimen

样品编号	出现时间/min	宽度用时/min	裂缝面积/mm ²
试件 - A	386	2. 22	624
试件 - B	427	2. 15	611
试件 - C	483	2. 03	607
试件 - D	533	1. 34	398
试件 - E	592	1. 05	267
试件 - F	622	0. 84	214

2.2 不同环境下损伤特性分析

由图 1 可知, 各种环境下, 随循环次数增加, 各个试验样品的损伤度范围在 0~0.85 之间, 整体呈上升趋势。比较 (a)、(b) 冻融循环对混凝土的破坏作用显著大于干缩湿胀循环, 这主要由于冻融时水分结冰产生 9% 的体积膨胀, 形成内部应力, 反复冻融导致微裂纹扩展, 冰晶压力破坏水泥石结构。而干缩湿胀仅引起 0.1%~0.3% 的体积变化, 且无相变应力产生。研究显示, 在 -15℃ 至 5℃ 的冻融循环条件下, 混凝土质量损失率可达 0.5%~1.2% 循环, 而干湿循环仅为 0.02%~0.05% 循环。(c) 是混合环

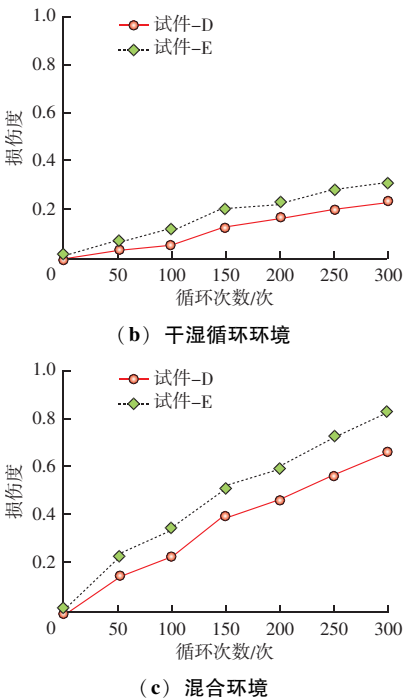
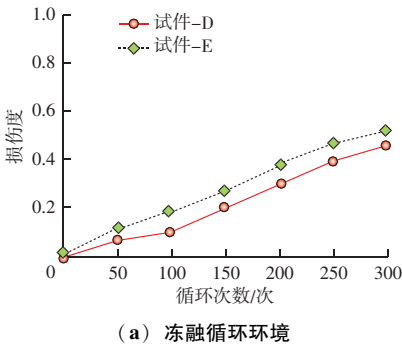


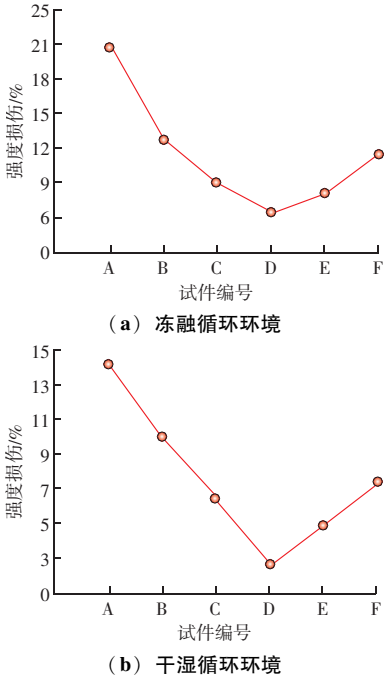
图 1 不同环境下损伤度分析

Fig. 1 Analysis of damage degree under different environments

境下试验样品的损伤情况, 在该情况下, 试验样品结构遭受严重破坏, 损伤度也更高。

2.3 不同环境下强度损伤分析

由图 2 (a) 可知, 试验样品受冻融循环影响, 使得裂缝逐渐扩大, 静水压作用于混凝土, 导致混凝土强度降低范围较大。从试验结果来看, 粉煤灰



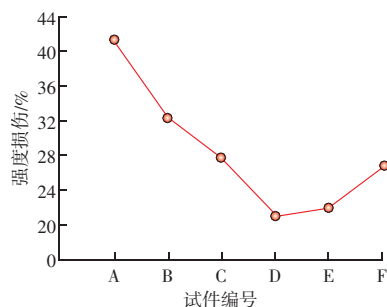


图2 不同环境下强度损伤

Fig. 2 Intensity damage under different environments

掺量为 150 kg/m^3 的试件 D, 在不同环境下还能保持在较高水平。图 2 (b) 中, 虽然干湿循环会产生盐性物质侵蚀粉煤灰混凝土, 但是相比于其他环境, 干湿循环不会严重破坏混凝土的结构。图 2 (c), 冻融循环与干湿循环相结合的复杂环境会加快试验试件的强度损失, 影响粉煤灰混凝土的力学性能。两种复杂环境共同影响试件, 冻融循环导致混凝土内部出现裂缝, 干湿循环产生的盐分沿着该裂缝更方便渗入到混凝土内部, 加剧侵蚀作用导致混凝土强度发生严重破坏。

3 结论

试验探究粉煤灰掺量对裂缝损伤特性的影响以及不同环境下试验样品的损伤度和强度损伤变化。主要结论为:

(1) 粉煤灰掺量增加可延长试件首条裂缝出现时间, 降低裂缝宽度与面积, 但存在最佳掺量范围。

(2) 不同环境下, 试验样品损伤度上升。冻融循环对试验样品造成的损伤较大, 会破坏内部结构; 干湿循环造成的损伤度相对较小; 混合环境下, 试验样品结构遭受严重破坏, 损伤度更高, 粉煤灰吸水再冻融是损伤加剧的原因。

(3) 冻融循环与干湿循环相结合的复杂环境会加快试验试件的强度损失, 影响力学性能, 二者相互耦合促进侵蚀作用。

参 考 文 献

- [1] 孙鑫蕊, 王学志, 辛明, 等. 硅锰渣复合粉煤灰制备免蒸压加气混凝土 [J]. 金属矿山, 2023 (1): 289–295.
- [2] 黄榜彪, 张恒, 黄秉章, 等. 烧结页岩砖再生细骨料混凝土性能及微观分析 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (8): 79–82.
- [3] 陈志华, 陈先华, 罗秋伦, 等. 高掺量粉煤灰对高延性水泥基材料力学性能影响 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (11): 142–148.
- [4] 李永靖, 王松, 张淑坤, 等. 碳纳米管增强粉煤灰泡沫混凝土的制备及变形特性 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (11): 175–183.
- [5] 王茜, 冯红春, 周凯. 资源化利用粉煤灰的混凝土强度预测模型 [J]. 矿产综合利用, 2024, 45 (4): 195–202.
- [6] 蒋建华, 卢宸宸, 师效哲, 等. 纳米 SiO_2 改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (3): 10–17.
- [7] 高新, 路珏, 宋普涛, 等. 大掺量粉煤灰制备水下不分散混凝土及性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (6): 56–60.
- [8] 邵善庆, 龚爱民, 屈宝莉, 等. 冻盐耦合作用下掺碱粉煤灰混凝土的劣化规律 [J]. 水力发电学报, 2024, 43 (5): 115–122.
- [9] 付振博, 杨曦昊, 赵伊萌, 等. 粉煤灰掺量对碱激发材料干燥收缩及抗压强度的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1717–1725.
- [10] 夏群, 赵岑, 朱平华, 等. 粉煤灰掺量对直通孔型再生透水混凝土抗盐冻及透水性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (10): 95–99110.
- [11] 文安飞, 张政, 霍志强, 等. 级配再生细骨料及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 17–21.
- [12] 莫黎, 魏留明, 周强, 等. 不同养护制度下粉煤灰混凝土压缩冻融损伤演化 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (7): 101–104.
- [13] 张玉栋, 张富钧, 谢龙, 等. 粉煤灰再生混凝土损伤模型与试验对比研究 [J]. 混凝土, 2024 (3): 92–96.
- [14] 杨振华, 胡平平. 高温作用下粉煤灰再生混凝土损伤演化规律与损伤特性 [J]. 混凝土, 2024 (6): 88–92.
- [15] 柴石玉, 张凌凯. 干湿–冻融循环对碱激发粉煤灰–矿粉改性膨胀土力学特性的损伤机理研究 [J]. 工程力学, 2024, 41 (11): 157–167.