

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*

Effect of Graded Recycled Fine Aggregate and Fly Ash Content on the Performance of Reactive Powder Concrete

文安飞¹, 张政², 霍志强², 努尔麦麦提·阿卜力米提³, 杨征勋^{2,4}

(1. 新疆农业大学 交通与物流工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130; 3. 成都理工大学, 四川 成都 611130;

4. 四川省交通运输绿色低碳建筑材料工程技术研究中心, 四川 成都 611130)

摘要: 以 0.26 和 0.28 作为活性粉末混凝土的基础水胶比, 用再生细集料全部取代石英砂, 研究分维值 D 和 20%、25%、30% 粉煤灰掺量对 RPC 抗压强度、抗折强度的影响, 并观察 RPC 的微观形貌。结果表明: 随级配分维值上升, RPC 流动度下降。级配分维值对 RPC 抗压强度、抗折强度有很大影响; 标准养护下早期抗压/抗折强度会呈现先下降再上升的趋势, 后期强度持续上升; 常温养护下随级配分维值增加, 抗压/抗折强度在不同的龄期均呈现上升趋势; 各组 RPC 强度随粉煤灰掺量增加而不断下降; 随着粉煤灰掺量增多, RPC 水化产物基本相同, 但内部微观结构呈现密实—疏松的变化趋势。

关键词: 再生细集料; RPC; 分形理论; 粉煤灰; 力学性能

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0017-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.004

WEN Anfei¹, ZHANG Zheng², HUO Zhiqiang², Nuermaimaiti · ABULIMITI³, YANG Zhengxun^{2,4}

(1. School of Traffic & Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China;

2. Sichuan Vocational and Technical College of communications, Chengdu 611130, China;

3. Chengdu University of Technology, Chengdu 611130, China; 4. Sichuan Province Transportation Green and

Low-carbon Building Materials Engineering Technology Research Center, Chengdu 611130, China)

Abstract: With a water - cement ratio of 0.26 and 0.28 as the base of active powder concrete, recycled fine aggregate replaced quartz sand. The effects of dimension value D and 20%, 25%, 30% fly ash content on the compressive and folding strength of RPC were studied and its microscopic morphology observed. Results: RPC flow degree decreases with increasing graded dimension. The graded dimension value greatly influences RPC's compressive and folding strength. Under standard curing, early compressive and folding strength decreases while later strength rises. Under normal temperature maintenance, compressive and folding strength at different ages increase with increasing graded dimension; With increasing fly ash, RPC hydration products are basically the same, but the internal microstructure shows a dense - loose trend.

Keywords: recycled fine aggregate; rpc; fractal theory; fly ash; mechanical property

* 基金项目: 四川省交通运输厅科技项目 (2018-C-03)。

作者简介: 文安飞 (1997—), 男, 硕士, 研究方向: 固体废弃物循环利用。

通信作者: 杨征勋 (1982—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 工业固体废弃物循环利用、绿色环保混凝土研发等。

收稿日期: 2023-05-09

材料科学

0 引言

我国公路建设快速发展,逐步转向建养并重的阶段。部分地区甚至已经普遍实施大中修、改扩建工程。在这一过程中,产生了大量的废弃混凝土面板,不仅占据了大量的土地资源,还对周围环境造成了严重影响^[1]。因此,对这些废弃混凝土面板进行处理和再利用,具有显著的社会、环境和经济效益。

废弃混凝土再利用一般用于再生混凝土的制备^[2-3],关于再生细集料的研究偏少;而再生细集料是将废弃混凝土经过破碎、筛分后粒径小于4.75 mm的再生骨料,其具有吸水率大,再生微粉需水量多等特点。目前部分学者将再生细集料用来替代天然砂制备传统再生混凝土,但并没有过多考虑再生细集料颗粒级配和再生微粉含量对混凝土的影响;而活性粉末混凝土(Reactive Power Concrete, RPC)是1993年法国学者Richard等研制出来的一种低水胶比新型水泥基复合材料^[4-5],能够利用再生细集料中的再生微粉用来填充RPC内部孔隙,降低孔隙率。同时由于石英砂价格昂贵,因此不少学者研究天然砂、再生砂以及铁尾矿砂等不同比例替换石英砂对活性粉末混凝土性能影响^[6-9],但很少有学者对再生细集料颗粒大小进行细分来研究对活性粉末混凝土性能影响以及再生细集料本身存在很多缺陷,如成分复杂、微裂纹、形状不规则、孔隙多以及颗粒形态差等^[10]。同时再生细集料中存在大量0.15 μm以下的再生微粉。虽然再生微粉化学成分和水泥相差不大,但其具有极高的吸水性,掺入后会影响到混凝土性能^[11]。

基于此,以固体废弃物再生细集料为原材料制备活性粉末混凝土。但考虑利用再生细集料中存在大量再生微粉,用来制备活性粉末混凝土会间接提高需水量,导致混凝土中存在更多未水化的水泥颗粒,从而降低混凝土强度,因此借助分形理论^[12-14]对再生细集料各个粒径进行赋值,进一步研究再生细集料颗粒级配对活性粉末混凝土影响;同时研究粉煤灰掺量对再生细集料活性粉末混凝土的影响以及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土微观形貌影响。

1 试验

1.1 原材料

水泥为峨胜P·O 42.5R级水泥,基本性能见表1;硅灰为白色粉末,其比表面积为21 m²/g, SiO₂含量为98.4%;粉煤灰基本性能见表2;高效减水剂颜色为浅黄色,减水率35%;再生细集料是通过将废弃混凝土块破碎、加工而得;钢纤维采用平直镀铜钢纤维,长度为12~14 mm,直径为0.18~0.23 mm;拌合水及养护水均为自来水。

表1 水泥基本性能

Table 1 Basic properties of cement

比表面积 /(m ² /kg)	凝结时间 /min		细度 /%	安定性	抗折强度 /MPa		抗压强度 /MPa	
	初凝	终凝			3 d	28 d	3 d	28 d

表2 粉煤灰化学成分及基本性能

Table 2 Chemical composition and basic properties of fly ash

主要成分/%				含水率 /%	密度 /(g/cm ³)	堆积密度 /(g/cm ³)
Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO			
24.2	45.1	2.1	5.6	0.85	2.55	1.12

1.2 配合比设计

为了研究再生细集料颗粒级配和粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响,设计了5种不同再生细集料级配以及20%、25%、30%的粉煤灰掺量。根据分维值D的再生细集料级配分布见表3,试验配合比见表4。

表3 再生细集料级配

Table 3 Grading of the regenerated fine aggregate

分维值	通过各筛孔粒径骨料质量分布/%				
	0.15 mm	0.315 mm	0.63 mm	1.18 mm	2.36 mm
2.40	19.1	10.8	15.4	23.0	31.7
2.45	22.0	11.0	15.4	22.6	29.0
2.50	25.2	11.3	15.2	21.1	27.2
2.55	29.0	11.0	15.2	19.9	24.9
2.60	33.2	11.5	15.3	17.6	22.4

表4 再生细集料级配RPC配合比

Table 4 Recycled fine aggregate RPC mix ratio

编号	水泥 /g	粉煤灰 /g	硅灰 /g	钢纤维 /g	分维值	减水剂 /g	水胶比
1	547.4	136.9	65.7	30	D	18.75	0.26*
2	568.2	113.6	68.2	30		18.75	0.28
3	547.4	136.9	65.7	30		18.75	0.28
4	528.2	158.5	63.3	30		18.75	0.28

注: *代表室温养护和标准养护,其他仅为标准养护;分维值D为2.40、2.45、2.50、2.55、2.60。

1.3 制备工艺及养护

按照配合比将再生细集料、水泥、粉煤灰、硅灰加入搅拌机，干拌 3 min 使其充分混合，然后将水和减水剂混合后加入搅拌机中低速搅拌 1 min，再加入钢纤维低速搅拌 1 min，高速搅拌 3 min，最后将拌合物装入尺寸为 40 mm × 40 mm × 160 mm 试模，在试模中静停 24 h 后放入标准养护箱养护和室温养护，龄期为 3、7 和 28 d。

2 试验结果分析

2.1 活性粉末混凝土流动度

图 1 为水胶比为 0.26 不同分维值下 RPC 的流动度测试结果。随着级配分维值增加，RPC 流动性呈下降趋势。这是因为随着级配分维值增加，再生细集料中再生微粉不断增多，而再生微粉吸水性强，且未经粉磨的再生微粉表面粗糙，会加大胶砂颗粒之间的阻力，导致水泥胶砂流动性下降。级配分维值 D 为 2.55、2.60 时，RPC 流动度过低，因此后续标准养护时应该适当提高水胶比。

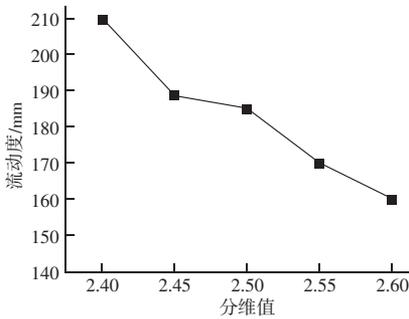


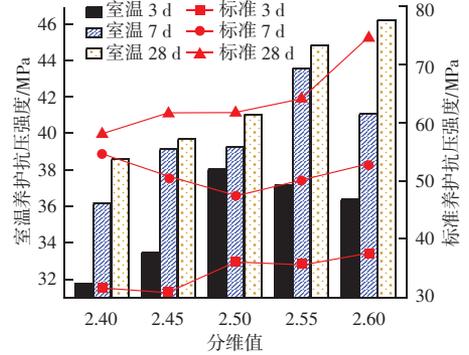
图 1 分维值对流动度影响

Fig. 1 Effect of dimension value on the flow degree

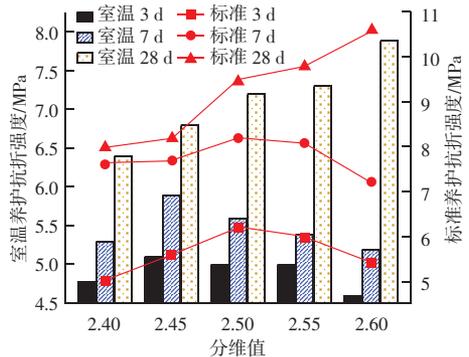
2.2 抗压强度和抗折强度

2.2.1 不同养护条件

对各组 3、7 和 28 d 龄期 RPC 试件（水胶比 0.26）进行抗压和抗折强度测试，结果如图 2 所示。不同养护条件下各组 RPC 试件抗压强度均随着龄期的增加而增加。其中室温养护下，RPC 试件 3、7 d 的抗压强度随着分维值增大呈先上升再下降趋势，28 d 强度持续上升。因为随着分维值增大，再生细集料中再生微粉含量增多，导致水泥胶砂体系中实际水胶比下降，反应速率下降，从而 RPC 早期强度降低；但随着龄期增加，再生微粉填补 RPC 中孔隙，使得 RPC 抗压强度上升。标准养护下，各组 RPC 试



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

图 2 不同养护条件下 RPC 抗压/抗折强度
Fig. 2 RPC compressive/flexural strength under different curing conditions

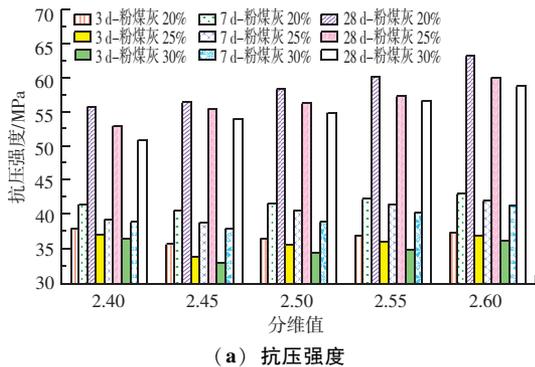
件 3、7 d 的抗压强度呈现先下降再上升的趋势，28 d 强度与室温养护下呈现趋势一致。这是因为标准养护下 RPC 早期强度发展较慢，随着分维值增加，再生细集料中再生微粉含量增多以及粒径 0.63 mm 以上再生细骨料减少，RPC 强度发生下降，但随着再生微粉进一步增多，降低孔隙率，从而使得 RPC 抗压强度上升。而不同养护条件下各组 RPC 试件的抗折强度随龄期的增加而增加。各组 RPC 的抗折强度因级配分维值和养护方式而变化的规律相同。由于再生骨料上旧砂浆与 RPC 中新砂浆的黏结强度高于骨料与 RPC 中新砂浆的黏结强度，同时随着再生微粉占比增加，导致整个体系能够参与早期反应的水量降低。因此，早期 RPC 抗折强度呈现先上升再下降的趋势，后期 RPC 抗折强度随级配分维值和养护方式改变而上升。

2.2.2 粉煤灰掺量影响

考虑级配分维值对 RPC 流动度的影响，后续试验调整水胶比为 0.28。对各组 3、7、28 d 龄期 RPC 试件进行抗压、抗折测试，得到 20%、25%、30%

材料科学

不同粉煤灰掺量下不同分维值的抗压强度和抗折强



度结果, 如图 3 所示。

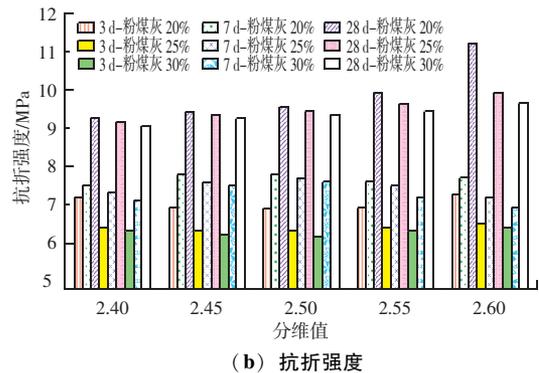


图 3 不同分维值、粉煤灰掺量下强度

Fig. 3 Strength under different dimension values and fly ash content

各组 RPC 抗压强度、抗折强度均随着龄期增长而增长, 随着粉煤灰掺量的增加而下降。与图 2 对比, 可以发现在水胶比升高的前提下, RPC 强度下降。随着级配分维值的增加、粉煤灰掺量相同的情况下, RPC 早期抗压强度先下降再上升, 后期抗压强度逐渐上升。这是因为不同的级配分维值下, 再生细集料堆积框架中的空隙不一样, 如图 4 所示。分维值为 2.45 时, 粗骨料与细骨料之间的协同作用差, 导致此时 RPC 早期强度最低; 分维值为 2.60 时, 随着再生微粉增多, 能够减少颗粒之间的空隙, 使得整个骨架更加密实。随着粉煤灰掺量增加、级配分维值相同的情况下, RPC 抗压强度随粉煤灰掺量增加而不断下降。这是因为粉煤灰活性低, 在 RPC 中起到填充孔隙作用, 随着粉煤灰掺量进一步增多会

使水泥水化过程中的水化产物含量降低, 从而导致 RPC 强度降低。随着级配分维值的增加、粉煤灰掺量相同的情况下, RPC 的 3 d 抗折强度变化不明显, 7 d 抗折强度先上升再下降, 28 d 抗折强度逐渐上升。这是因为再生骨料本身粒径分布不规则和棱角不规则, 随着级配分维值增加, 再生细骨料中粗颗粒含量降低, 粗颗粒之间的摩擦降低, 细骨料含量增多导致 RPC 早期抗折强度降低; RPC 后期强度逐渐上升是因为再生微粉能够弥补 RPC 空隙, 降低孔隙率, 导致 RPC 强度升高。随着粉煤灰掺量增加、级配分维值保持不变的情况下, 各组 RPC 抗折强度不断下降。这是因为随着粉煤灰掺量增大, 增加 RPC 孔隙, 即使随着级配分维值增加也不足以弥补空隙缺陷, 从而 RPC 抗折强度降低。

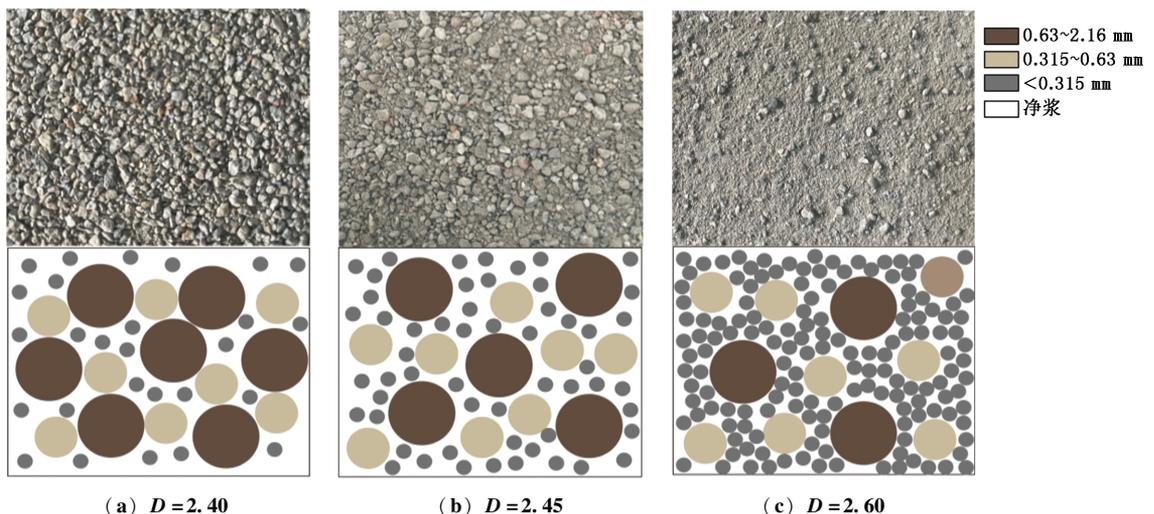


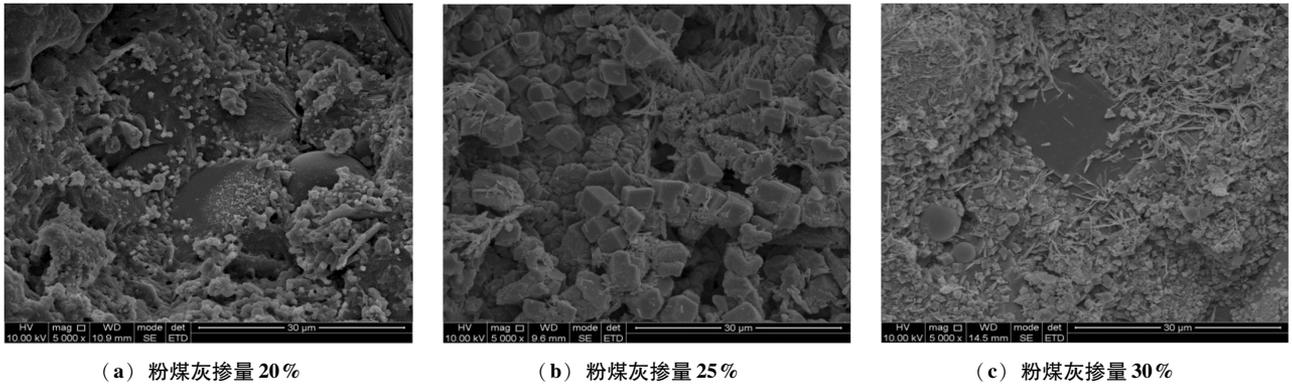
图 4 不同分维值的细集料骨架结构

Fig. 4 Skeleton structures of fine aggregate with different division dimension values

2.3 SEM 微观形貌分析

根据抗压结果选择粉煤灰掺量为 20%、25%、30%、级配分维值为 2.60 的 28 d 试件进行 SEM 扫描，得到微观形貌，如图 5 所示。样本中存在 C-S-H 凝胶、块状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、球状为未反应的胶凝材料以及一些针片状水化产物。图 5 (a) 中存在少量块状

CH 和 C-S-H 凝胶，图 5 (b) 中存在较多块状 CH，图 5 (c) 中存在大量 CH 及针片状水化产物。随着粉煤灰掺量增多，部分参与火山灰反应，更多起填充作用，但不利影响的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 增多致 RPC 强度下降。



(a) 粉煤灰掺量 20%

(b) 粉煤灰掺量 25%

(c) 粉煤灰掺量 30%

图 5 不同粉煤灰掺量 SEM

Fig. 5 SEM of different fly ash content

3 结论

(1) 随着级配分维值的增加，活性粉末混凝土的流动度不断下降。

(2) 常温养护和标准养护下，级配分维值 D 为 2.60 时，活性粉末混凝土 28 d 抗压/抗折强度最好。

(3) 标准养护下，粉煤灰掺量增加对 RPC 强度产生负面影响。

(4) 水胶比对 RPC 具有较大影响，水胶比 0.28 的 RPC 比 0.26 的拌合物流动性越好，但其强度随水胶比增大而降低。

参 考 文 献

- [1] 吴申. 建筑垃圾再生集料对道路基层材料性能影响 [J]. 绿色建材, 2022 (6): 77-80.
- [2] 石建光. 再生骨料对混凝土性能影响的试验研究和计算分析 [D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [3] 邵珠山, 王维涛, 赵冬, 等. 微波照射下附着砂浆对再生混凝土粗骨料强度的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2024 (1): 27-34.
- [4] 李新星, 杨才千, 周泉, 等. 基于正交试验的活性粉末混凝土

强度及流动性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1201-1210.

- [5] 张景瑞, 李卫炎, 黄前龙, 等. 凝灰岩石粉掺量对活性粉末混凝土性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1), 40-46.
- [6] 田耀刚, 阎宝宝, 陈惠坤, 等. 标准养护条件下铁尾矿制备 RPC 力学性能研究 [J]. 功能材料, 2021, 52 (4): 4153-4159.
- [7] 朱博, 段峰, 何娟, 等. 陶砂替代石英砂制备活性粉末混凝土 (RPC) 的性能研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (10): 69-73.
- [8] 杨彦生. 煤矸石砂 RPC 力学性能试验分析 [J]. 山西建筑, 2022, 48 (6): 109-111.
- [9] 张智, 蔡自伟, 李凌志, 等. 再生砂超高性能混凝土力学性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39 (11): 5158-5169.
- [10] 葛晓丽, 储洪岩. 再生砂超高性能混凝土力学性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (4): 810-815.
- [11] 张梦圆. 再生微粉对 UHPC 性能和微观结构的影响研究 [D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2022.
- [12] 魏德敏, 张衡. 分形几何学在混凝土断裂性能研究中的应用 [J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18 (4): 135-136.
- [13] 夏春, 刘浩吾. 混凝土细骨料级配的分形特征研究 [J]. 西南交通大学学报, 2002, 37 (2): 186-189.
- [14] 姜晓伟, 宓永宁, 高跃. 不同分维骨料级配混凝土性能影响的研究 [J]. 房材与应用, 2006, 34 (2): 5-7.