

DOI: 10.7672/sgjs2025220142

再生骨料混凝土在垫层中的试验研究

李飞

(中铁贵州工程有限公司, 贵州 安顺 561113)

[摘要] 随着基础建设的不断发展,废弃建筑混凝土越来越多,处理成本也不断攀升。为了降低建筑成本,提高建筑垃圾在工程中的循环利用率,开展低建筑成本再生骨料混凝土在垫层中的应用研究。通过单因素实验研究了再生细骨料取代率、预处理形式对混凝土流动性和力学性能的影响,得出满足应用要求的再生细骨料最佳取代率。结果表明:掺加再生细骨料会降低混凝土的流动性;再生细骨料取代率40%以内能够提高混凝土7d抗压强度;混凝土28d抗压强度和劈裂抗拉强度均随再生细骨料掺量的增加而逐渐降低;再生细骨料的最佳取代率为40%,最佳预处理形式为预湿再生细骨料。再生细骨料混凝土在垫层中应用具有绿色环保、成本低等优势。

[关键词] 再生细骨料;垫层;流动性;力学性能;试验

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0142-04

Experimental Research on the Application of Recycled Aggregate Concrete in Cushion Layers

LI Fei

(China Railway Guizhou Engineering Co., Ltd., Anshun, Guizhou 561113, China)

Abstract: With the continuous development of infrastructure, the amount of abandoned building concrete is increasing, and the processing cost is also constantly rising. In order to reduce construction costs and improve the recycling rate of construction waste in engineering, research is being conducted on the application of low-cost recycled aggregate concrete in the cushion layer. The influence of recycled fine aggregate substitution rate and pretreatment form on the flowability and mechanical properties of concrete was studied through single factor experiments, and the optimal substitution rate of recycled fine aggregate that meets application requirements was obtained. The results indicate that the addition of recycled fine aggregate will reduce the flowability of concrete; The replacement rate of recycled fine aggregate within 40% can improve the compressive strength of concrete within 7 days; The compressive strength and splitting tensile strength at 28 days gradually decrease with the increase of recycled fine aggregate content; The optimal substitution rate of recycled fine aggregate is 40%, and the optimal pretreatment form is pre wetted recycled fine aggregate. The application of recycled fine aggregate concrete in the cushion layer has advantages such as green environmental protection and cost reduction.

Keywords: recycled fine aggregate; cushion layer; flow performance; mechanical property; tests

1 室内试验

1.1 原材料

试验采用的主要原材料:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥和 I 级粉煤灰作为胶凝材料;5~25mm 连续级配的花岗岩碎石作为粗骨料,天然河砂和再生细骨料作为细骨料。再生细骨料来源于原生强度等级为 C60 的废弃混凝土,经破碎、细碎、筛分和复配

得到再生细骨料,其品质满足 I 类再生细骨料的标准要求。天然河砂和再生细骨料的关键性能指标如表 1 所示。此外,试验采用聚羧酸减水剂作为化学外加剂。

表 1 细骨料性能指标

Table 1 Performance indicators of fine aggregate

细骨料	细度模数	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎值/%	孔隙率/%
天然河砂	2.4	2 541	14.1	41.1
再生细骨料	2.6	2 504	15.9	42.9

[作者简介] 李飞,工程师,E-mail:roadhu123@163.com

[收稿日期] 2025-09-05

1.2 混凝土配合比设计

设计混凝土抗压强度等级为 C40。再生粗骨料、再生细骨料、再生微粉等材料掺入混凝土中会降低混凝土的抗压强度,拌合掺绿色建筑材料的混凝土,需提高抗压强度富余系数,以达到工程应用要求。因此,综合考虑影响因素,设计抗压强度富余系数为 1.35。参考 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》(2015 年版),通过试验确定基础配合比为水泥:粉煤灰:河砂:石子:减水剂:水=380:90:840:910:0.35:178kg/m³。

2 再生细骨料对混凝土性能的影响

2.1 流动性

以再生细骨料不同比例取代河砂,研究对混凝土流动性的影响,再生细骨料取代率为 0,20%,40%,60%,80%,100%,试验配合比如表 2 所示,以混凝土扩展度、倒置坍落度筒排空时间作为试验表征指标。

表 2 再生细骨料取代试验配合比

Table 2 Test mix proportion of recycled fine aggregate replacement		kg · m ⁻³					
序号	再生细骨料	水泥	粉煤灰	河砂	石子	减水剂	水
1-1	0	380	90	840	910	0.35	178
1-2	168	380	90	672	910	0.35	178
1-3	336	380	90	504	910	0.35	178
1-4	504	380	90	336	910	0.35	178
1-5	672	380	90	168	910	0.35	178
1-6	840	380	90	0	910	0.35	178

试验结果表明,试验序号 1-1~1-6 的扩展度分别为 630,600,580,552,515,490mm,倒置坍落度筒排空时间分别为 5.7,5.9,6.4,6.9,7.4,7.9s。再生细骨料掺量由 0 增加至 840kg/m³,扩展度降低 140mm,倒置坍落度筒排空时间提高 2.2s。随着再生细骨料掺量的增加,混凝土扩展度逐渐减小,二者呈一次线性关系。

分析再生细骨料对混凝土流动性的影响原因可知,由于再生细骨料因破碎而成,颗粒形态不规则,多呈现锥形,在混凝土体系中与浆体接触后的润滑效果较差,且本身孔隙较多,会吸收体系中的自由水,自由水含量降低后,扩展度减小,倒置坍落度筒排空时间增大^[1-4]。同时,天然河砂本身含水,吸水率低,且其颗粒经天然风化而成,表面光滑,在混凝土体系中能与胶凝材料胶体充分接触,从而增加润滑效果。

2.2 力学性能

以抗压强度、劈裂抗拉强度作为试验表征指

标,再生细骨料对混凝土力学性能的影响规律如图 1 所示。由图 1 可知,混凝土的 7d 抗压强度随再生细骨料掺量的增加呈先增加后降低的趋势,并在取代率为 40% (掺量 336kg/m³) 时达到峰值 34MPa。相比之下,28d 抗压强度与劈裂抗拉强度则随再生细骨料掺量的增加而单调递减。当取代率从 0 增至 100% 时,28d 抗压强度从 51MPa 降至 40MPa,劈裂抗拉强度从 3.75MPa 降至 2.75MPa。

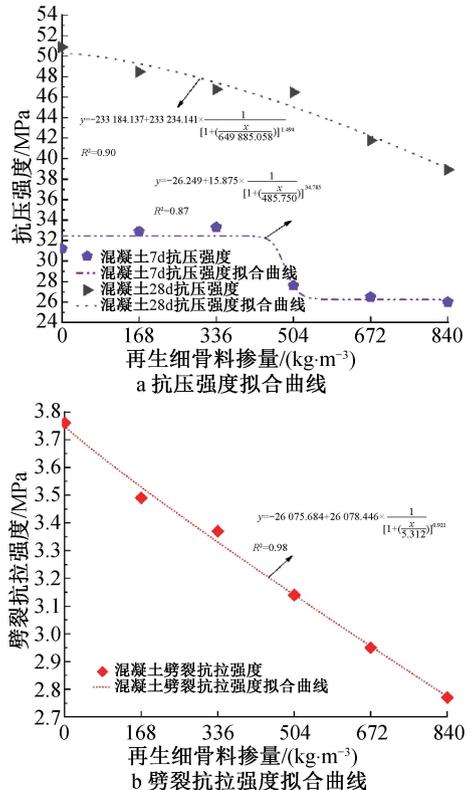


图 1 力学性能试验结果

Fig. 1 Test results of mechanical property

通过非线性拟合可知,再生细骨料掺量与各强度指标间具有显著相关性。综合分析 7d 与 28d 强度变化规律,确定再生细骨料的最佳取代率为 40%。此时,混凝土的 28d 抗压强度为 47MPa,仍高于 C40 的设计强度要求,且具有最高的早期强度。

分析再生细骨料对混凝土力学性能影响原因:再生细骨料取代天然河砂,一方面会因吸水减少水泥水化所需的自由水,造成水泥水化不充分,降低强度;另一方面,再生细骨料形状不规则,破碎混凝土脆性大,易产生脆性破坏,对劈裂抗拉强度的影响显著^[5]。通过再生细骨料对混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响结果得出再生细骨料最佳取代率为 40%。

综上所述,再生细骨料最佳取代率为 40% (即再生细骨料占细骨料总量的 40%,天然河砂

占60%)。

2.3 预处理形式

与河砂相比,再生细骨料吸收水分过多,降低了混凝土的抗压强度和扩展度。考虑到再生细骨料具有强各向异性特性,设计3种再生细骨料预处理形式研究对混凝土性能的影响。①预处理1,未处理;②预处理2,预湿再生细骨料;③预处理3,不预湿,附加拌合水。

试验得出再生细骨料取代率宜在60%范围内,选取再生细骨料取代率0,20%,40%,60%进行试验研究。再生细骨料预处理形式如表3所示,试验结果如表4,5所示。

表3 再生细骨料预处理形式

Table 3 Pre-treatment forms of recycled fine aggregates

序号	处理形式	取代率/%	再生细骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	河砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	拌合水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
2-1	预处理1	0	0	840	0
2-2		20	168	672	0
2-3		40	336	504	0
2-4		60	504	336	0
2-5	预处理2	0	0	840	0
2-6		20	168	672	0
2-7		40	336	504	0
2-8		60	504	336	0
2-9	预处理3	0	0	840	0
2-10		20	168	672	10
2-11		40	336	504	15
2-12		60	504	336	20

表4 不同预处理形式下的扩展度

Table 4 Pre-treatment expansion degree under different pretreatment forms

再生细骨料 取代率/%	扩展度/mm		
	预处理1	预处理2	预处理3
0	625	630	640
20	600	610	600
40	565	605	580
60	550	590	560

表5 不同预处理形式下的抗压强度

Table 5 Compressive strength under different pretreatment forms

再生细骨料 取代率/%	抗压强度/MPa		
	预处理1	预处理2	预处理3
0	50.9	49.8	46.9
20	48.5	49.0	47.5
40	46.2	47.1	46.4
60	46.0	46.9	45.5

由表4可知,在不进行任何预处理措施条件下,混凝土扩展度变化幅度较大。当预湿润再生细骨料时,混凝土扩展度变化幅度最小。预处理3得到的混凝土扩展度变化幅度最大。采用预处理2,再

生细骨料取代率的变化对混凝土扩展度的影响较小,其在混凝土扩展度方面表现出的性能更稳定。

由表5可知,不同再生细骨料取代率下预处理2总体抗压强度基本为最大。从抗压强度变化差值率和抗压强度值分析,采用预处理2后的混凝土抗压强度较大,同时差值率也较小。综上所述,建议采用预处理2作为再生细骨料取代率的预处理方式。

预湿再生细骨料有助于再生细骨料吸水饱和,从而达到与河砂近似的自身性状,掺加到混凝土体系中不会因为吸水而减少体系中的自由水,影响水泥水化。预处理3为直接附加拌合水,直接加水会使得拌合物离析、泌水跑浆,影响混凝土抗压强度。综合再生细骨料预处理形式及对混凝土扩展度、28d抗压强度的影响,确定最佳预处理形式为预湿再生细骨料。

2.4 最佳配合比与成本分析

通过上述试验研究得出再生细骨料掺量、预处理形式对混凝土性能的综合影响规律,综合试验结果并结合混凝土实际应用得出再生细骨料的最佳取代率为40%,即 $336\text{kg}/\text{m}^3$ 。再生细骨料最佳用量为水泥 $380\text{kg}/\text{m}^3$ 、粉煤灰 $90\text{kg}/\text{m}^3$ 、天然河砂 $504\text{kg}/\text{m}^3$ 、再生细骨料 $336\text{kg}/\text{m}^3$ 、石子 $910\text{kg}/\text{m}^3$ 、聚羧酸减水剂 $0.35\text{kg}/\text{m}^3$ 、水 $178\text{kg}/\text{m}^3$ 。通过在垫层中的应用成本分析可以得出, 1m^3 再生细骨料混凝土综合成本降低34.2元。在保证混凝土质量的同时,通过掺加再生细骨料降低混凝土成本。

3 工程应用建议

1)再生细骨料混凝土在垫层中应用时,再生粗骨料(I类或II类,粒径 $5\sim 31.5\text{mm}$)需符合GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》,即压碎指标 $\leq 20\%$,吸水率 $\leq 5\%$ 。配合少量再生细骨料(I类或II类,细度模数 $2.3\sim 3.0$),改善级配连续性,避免离析^[6-7]。

2)清除再生骨料表面附着的老旧水泥浆及杂质,控制 0.075mm 以下颗粒含量 $\leq 3\%$ 。拌合前喷雾预湿至含水率 $2\%\sim 3\%$,稳定水胶比^[8-10]。

3)高地下水水位地区需提高垫层标高,避免再生骨料长期浸泡导致强度衰减,也可采用水泥稳定再生骨料(水泥掺量 $\geq 5\%$)增强抗渗性。

4 结语

1)随着再生细骨料掺量增加,混凝土扩展度逐渐减小,混凝土倒置坍落度筒排空时间逐渐增大。

2)随着再生细骨料掺量增加,混凝土7d抗压强度先提高后降低,28d抗压强度逐渐降低,劈裂抗

拉强度逐渐降低。通过再生细骨料对混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度影响结果得到再生细骨料最佳取代率为40%。

3)通过再生细骨料预处理形式及对混凝土扩展度和28d抗压强度影响,确定最佳预处理形式为预湿再生细骨料。

参考文献:

- [1] 孔琳洁. 利用建筑废弃物制备再生骨料混凝土的现状分析[J]. 江西建材, 2021(1):16-17.
KONG L J. Current situation analysis of recycled aggregate concrete prepared from construction waste[J]. Jiangxi building materials, 2021(1):16-17.
- [2] 宗振杰, 张璐, 张伟. 混合再生骨料混凝土强度性能的试验研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(4):20-26.
ZONG Z J, ZHANG L, ZHANG W. Experimental study of the strength properties of mixed recycled aggregate concrete[J]. Journal of Shandong University of Technology (natural science edition), 2024, 38(4):20-26.
- [3] 徐宝军, 赵欢, 刘海园, 等. 大流动性再生骨料混凝土试验研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(6):81-83.
XU B J, ZHAO H, LIU H Y, et al. Experimental study on high mobility recycled aggregate concrete[J]. Shanxi architecture, 2019, 45(6):81-83.
- [4] 张少峰, 杨凯, 郭俊珍, 等. 再生细骨料自密实混凝土试验研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(8):111-113.
ZHANG S F, YANG K, GUO J Z, et al. Experimental study on recycled fine aggregate self-compacting concrete[J]. Shanxi architecture, 2024, 50(8):111-113.
- [5] 张桂林, 孙江枫, 陈庞, 等. 再生粗细骨料混凝土受拉力学性

能研究[J]. 混凝土, 2024(3):131-135.

ZHANG G L, SUN J F, CHEN P, et al. Study on tensile properties of recycled coarse and fine aggregate concrete[J]. Concrete, 2024(3):131-135.

- [6] 潘祿. 房建隐蔽工程再生混凝土应用研究[J]. 砖瓦, 2025(8):67-70.

PAN L. Study on the application of recycled concrete in concealed engineering of housing construction[J]. Brick-tile, 2025(8):67-70.

- [7] 张建伟, 彭剑, 王飞, 等. 锈蚀箍筋约束再生混凝土压应力-应变关系研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(15):33-39.

ZHANG J W, PENG J, WANG F, et al. Study on compressive stress-strain relationship of recycled concrete confined by corroded stirrups[J]. Building structure, 2025, 55(15):33-39.

- [8] 罗佳乐, 马兵, 李坤鹏, 等. 再生混凝土抗冻融耐久性能改善措施研究现状分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(22):1-9.

LUO J L, MA B, LI K P, et al. Research status analysis of resistance improvement measures of frost-shaw durability of recycled aggregate concrete[J]. Construction technology, 2024, 53(22):1-9.

- [9] 张建鹏. 再生混凝土力学性能及耐久性试验研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(14):125-130.

ZHANG J P. Experimental research on mechanical properties and durability of recycled concrete[J]. Construction technology, 2024, 53(14):125-130.

- [10] 王昌盛. 建筑工程施工中再生混凝土的应用探究[J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(7):164-166.

WANG C S. Research on the application of recycled concrete in construction engineering[J]. Foshan ceramics, 2025, 35(7):164-166.

(上接第136页)

- HU Z H, JIA Z R, ZHANG W G, et al. Experimental study and engineering application of cement stabilized recycled aggregate pavement base course[J]. Construction technology, 2016, 45(7):126-129.
- [3] 舒明旺. 混合再生沥青混合料路基土工程特性研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(9):28-33.
SHU M W. Research on engineering properties of subgrade soil using mixtures of reclaimed asphalt pavement[J]. Construction technology, 2024, 53(9):28-33.
- [4] 王学银. 超载对公路沥青面层受力分布及稳定性的影响[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(10):115-119, 166.
WANG X Y. Influence of overload on stress distribution and

stability of expressway asphalt pavement[J]. Construction technology, 2024, 53(10):115-119, 166.

- [5] 冯云龙, 周振东, 张静晓, 等. 沥青混凝土路面施工质量监督系统的构建与实现[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5):13-19.
FENG Y L, ZHOU Z D, ZHANG J X, et al. Construction and realization of construction quality monitoring system of asphalt concrete pavement[J]. Construction technology, 2023, 52(5):13-19.

- [6] 王铨. 车辆制动荷载对再生沥青混合料面层变形的影响[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5):138-141, 146.

WANG A. Influence of vehicle braking load on deformation for recycled asphalt mixture surface layer[J]. Construction technology, 2025, 54(5):138-141, 146.