

建筑垃圾再生骨料预制条板性能研究

韩方达^{1,2}, 张家豪^{1,3}, 高树凯⁴, 吴博宇^{1,3}, 张宗楼⁵

- (1. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050000;
2. 石家庄市建筑及市政工程智能检测诊断技术创新中心, 石家庄 050000;
3. 河北省固废建材化利用重点实验室, 石家庄 050000;
4. 石家庄市鹿泉区建筑业服务中心, 石家庄 050000; 5. 邯郸市丛台区宗楼建筑有限公司, 邯郸 056000)

摘要: 为实现建筑垃圾再生骨料综合利用, 以建筑垃圾再生骨料和预制条板为研究对象, 进行了再生骨料表观密度、泥块含量、压碎指标、质量损失率、颗粒级配试验研究, 预制条板抗压强度、抗剪强度、抗冲击性能和干燥收缩试验研究。结果表明: 再生骨料表观密度与天然骨料相比低 12%。再生骨料条板, 蒸压加气块砌体和预制轻混凝土抗压强度比值为 1 : 0.55 : 0.64; 再生骨料条板, 蒸压加气块砌体和预制轻混凝土干燥收缩值比值为 1 : 0.92 : 1.18。利用建筑垃圾作为骨料, 减少碳排放、降低造价成本, 可用于农村自建房的建造使用。

关键词: 建筑垃圾; 再生骨料; 预制条板; 表观密度; 抗压强度; 干燥收缩

中图分类号: TU 528.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0028-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.005

Experimental Study on Performance of Precast Slats Made from Construction Waste Recycled Aggregate

HAN Fangda^{1,2}, ZHANG Jiahao^{1,3}, GAO Shukai⁴, WU Boyu^{1,3}, ZHANG Zonglou⁵

- (1. Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;
2. Shijiazhuang Intelligent Testing and Diagnostic Technology Innovation Center for Construction and Municipal Engineering, Shijiazhuang 050000, China;
3. Key Laboratory of Solid Waste Building Materials Utilization in Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China;
4. Luquan District Construction Industry Service Center, Shijiazhuang City, Shijiazhuang 050000, China;
5. Zonglou Construction Co., Ltd. in Congtai District, Handan City, Handan 056000, China)

Abstract: To achieve comprehensive utilization of construction waste recycled aggregates, the research focused on construction waste recycled aggregates and prefabricated slabs. Experimental studies were conducted on the apparent density, clay lump content, crushing index, mass loss rate, and particle gradation of the recycled aggregates, as well as on the compressive strength, shear strength, impact resistance, and drying shrinkage of the prefabricated slabs. The results show that: The

作者简介: 韩方达 (1984—), 男, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 建筑材料检测。

通信作者: 高树凯 (1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程施工。

收稿日期: 2025-06-04

apparent density of recycled aggregate is about 12% lower than that of natural aggregate. The compressive strength ratio of recycled aggregate slab, autoclaved aerated block masonry and precast light concrete is about 1 : 0.55 : 0.64; The ratio of dry shrinkage of recycled aggregate slab, autoclaved aerated block masonry and precast light concrete is about 1 : 0.92 : 1.18. Using construction waste as aggregate can reduce carbon emissions and lower construction costs, and can be used for the construction of self built houses in rural areas.

Key words: construction waste; recycled aggregate; prefabricated slabs; apparent density; compressive strength; dry shrinkage

0 引言

目前,我国城市建筑垃圾年产生量高达 20 多亿吨,部分建筑垃圾缺少利用处置空间,违法违规倾倒问题仍时有发生。建筑垃圾占用大量土地资源并且会造成水和空气污染,存在滑坡隐患,对环境造成不良影响。十八大以来,我国便开始把生态文明建设放在全局工作的突出位置。国家已明确指出强化固体废弃物治理,加快“无废城市”建设,推动实现城乡“无废”,环境健康^[1]。到 2027 年,全国地级及以上城市建筑垃圾平均资源化利用率达到 50% 以上^[2]。

目前国内外学者已对建筑垃圾进行了相关研究。研究方向主要集中在再生骨料方面,通过回收建筑垃圾中的废混凝土、废砖瓦经过破碎筛分形成不同粒径的再生骨料,用来替代部分或全部天然骨料来作为混凝土的原料使用^[3]。研究表明再生骨料混凝土性能的影响因素包括水灰比^[4]、砂率、外加剂、用水量和骨料取代率^[5]等。肖建庄等^[6]在试验中发现,当再生骨料取代率达到 50% 时,再生混凝土强度高于普通混凝土;Verian 等^[7]总结出再生骨料表观密度的分布范围为 1 910 ~ 2 700 kg/m³;曾威振^[8]使用再生细骨料为原料,得到了面密度、抗压强度和干缩性能满足标准要求的免蒸压轻质隔墙板;高博^[9]用再生微粉替代水泥,研究了不同质量比例的再生微粉试件抗压强度等,试验结果表明随着再生微粉质量比例提高,试件抗压强度降低;马加存等^[10]研究发现再生混合骨料初始流动度和流动度经时损失率随再生骨料掺量和预湿时长的增加而降低;元成方等^[11]认为砖类再生骨料占比越大,制成的再生混凝土强度降幅越大;高旭等^[12]研究发现,在长期使用过程中,再生混凝土的抗压强度增长速度高于传统混凝土;王铁山等^[13]研究发现当再生骨料替代率不同时,再生混凝土的抗折强度普遍低于天然

混凝土。掺加钢纤维后可有效提升再生混凝土的抗折强度;康转转^[14]研究确定了基于再生骨料替代率(30%)、水灰比(0.4)和水泥掺入比(0.22)最佳配合比;李秋义等^[15]通过对再生骨料进行颗粒整形,改善了再生骨料的物理性能,显著提升混凝土力学性能、耐久性能;李滢等^[16]研究了再生粗骨料、再生细骨料的双取代下再生混凝土的力学性能变化规律,结果表明当再生粗骨料取代率一定时,随着再生细骨料替代率的提高,再生混凝土抗压强度变化呈现抛物线式规律。

综上,国内外学者主要针对再生骨料的配合比对混凝土强度等方面进行了研究,而对再生骨料预制条板性能研究较少。对建筑垃圾再生骨料进行了试验研究,对比天然骨料表观密度、泥块含量、压碎指标、质量损失率、颗粒级配性能指标,同时对建筑垃圾再生骨料预制条板进行了试验研究,分析其抗压强度、抗剪强度、抗冲击性能和干燥收缩,为再生预制条板的应用和设计提供依据和建议。

1 试验概况

以建筑垃圾再生骨料和预制条板为研究对象,进行了再生骨料表观密度、泥块含量、压碎指标、质量损失率、颗粒级配试验研究,预制条板抗压强度、抗剪强度、抗冲击性能和干燥收缩试验研究。

2 再生骨料工作性能试验研究

2.1 试验设计

试验对再生粗骨料、再生细骨料、天然粗骨料(碎石)、天然细骨料(天然砂)的表观密度、泥块含量、压碎指标、坚固性和颗粒级配进行了测定。参考国家标准 GB/T 14685—2022《建筑用卵石、碎石》和 GB/T 14684—2022《建筑用砂》中的试验方法。

材料科学

2.2 试验结果分析

由图 1 可知,再生粗骨料表观密度为 $2\,490\text{ kg/m}^3$,再生细骨料表观密度为 $2\,290\text{ kg/m}^3$,天然粗骨料表观密度为 $2\,820\text{ kg/m}^3$,天然细骨料表观密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$ 。与天然粗骨料表观密度相比,再生粗骨料表观密度约为其 88.3%,下降 11.7%;与天然细骨料相比,再生细骨料表观密度约为其 88.1%,下降 11.9%。

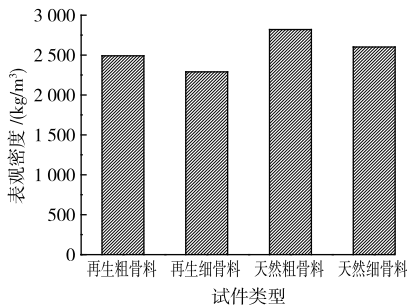


图 1 试件表观密度
Fig. 1 Apparent density of the test pieces

由图 2 可知,再生粗骨料泥块含量为 0.3%,再生细骨料泥块含量为 1.2%,天然粗骨料泥块含量为 0.1%,天然细骨料泥块含量为 0.6%。与天然粗骨料泥块含量相比,再生粗骨料泥块含量为其 3 倍,上升 300%;与天然细骨料泥块含量相比,再生细骨料泥块含量为其 2 倍,上升 200%。

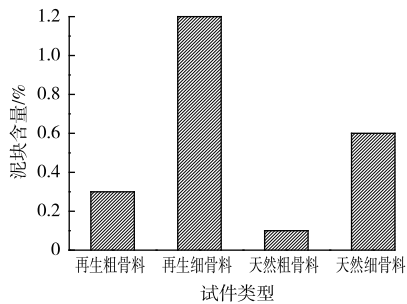


图 2 试件泥块含量
Fig. 2 Clay content of the test pieces

由图 3 可知,再生粗骨料压碎指标为 15%,再生细骨料压碎指标为 25%,天然粗骨料压碎指标为 8%,天然细骨料压碎指标为 14%。与天然粗骨料压碎指标相比,再生粗骨料压碎指标约为其 1.88 倍,上升 187.5%;与天然细骨料相比,再生细骨料压碎指标约为其 1.79 倍,上升 178.6%。

由图 4 可知,再生粗骨料质量损失率为 11.7%,

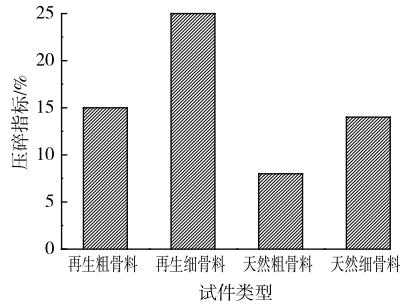


图 3 试件压碎指标
Fig. 3 Crushing index of the test pieces

再生细骨料质量损失率为 11.4%,天然粗骨料质量损失率为 4.0%,天然细骨料质量损失率为 2.0%。与天然粗骨料质量损失率相比,再生粗骨料质量损失率约为其 2.93 倍,上升 292.5%;与天然细骨料相比,再生细骨料质量损失率约为其 5.70 倍,上升 570%。

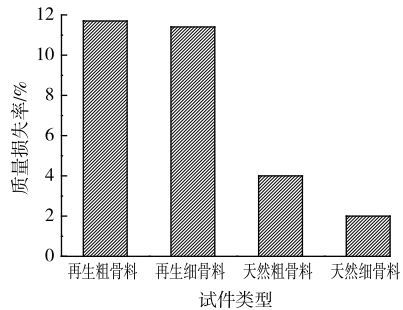


图 4 试件质量损失率
Fig. 4 Quality loss rate of the test pieces

由表 1 可知,再生粗骨料和天然粗骨料均在方筛孔尺寸为 19 mm 时出现筛余量,在方筛孔尺寸为 4.75 mm 时,再生粗骨料和再生细骨料筛余量基本达到 100%。

再生细骨料和天然细骨料均在方筛孔尺寸为 4.75 mm 时出现筛余量,在方筛孔尺寸为 0.15 mm 时,天然粗骨料和天然细骨料筛余量基本达到 90%。

再生粗骨料和天然粗骨料试件筛余量差距最大时发生在粒级尺寸为 4.75 mm 时,再生粗骨料比天然粗骨料筛余量高 21%;再生细骨料和天然细骨料试件筛余量差距最大时发生在粒级尺寸为 2.36 mm 时,再生粗骨料比天然粗骨料筛余量高 10%;粒级尺寸小于 2.36 mm 时,再生细骨料筛余量均比天然细骨料筛余量低 5%左右。

表 1 试件颗粒级配
Table 1 Particle size distribution of test pieces /%

	方孔筛孔径/mm								
	26.00	19.00	9.50	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15
再生粗骨料	3	76	100	100	100	100	100	100	100
再生细骨料				3	23	33	47	70	88
天然粗骨料	8	55	99	100	100	100	100	100	100
天然细骨料				3	13	30	55	75	93

2.3 试验结论

再生骨料在表观密度和颗粒级配方面与天然骨料差距较小，再生骨料表观密度与天然骨料相比低 12% 左右；相同粒径尺寸再生骨料筛余量与天然骨料筛余量相比差距最大在 20% 左右。

再生骨料在泥块含量、压碎指标和质量损失率方面与天然骨料差距较大，再生骨料泥块含量与天然骨料相比高 200%~300% 左右；再生骨料压碎指标与天然骨料相比高 180% 左右；再生骨料坚固性与天然骨料相比低 290%~570% 左右。

3 预制条板工作性能试验研究

3.1 试验设计

3.1.1 抗压强度

抗压强度试件在整面墙板上截取宽度不大于 400 mm，高度为 1 000 mm 的试块组件 3 块，将试块上下受压面用混凝土找平，养护不少于一周。抗压强度试件如图 5 所示。

试块养护一周后，按 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》进行抗压强度试验。

3.1.2 抗剪强度

抗剪强度试件在整面墙板上截取 550 mm 长，400 mm 宽的试块组件 3 块，保留 2 个完整孔，对两个带孔的端面做 1:2 水泥砂浆找平层处理。抗剪强度试件如图 6 所示。

试块养护一周后，结合 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》进行抗剪强度试验。

3.1.3 抗冲击性能

抗冲击性能试验试件长度尺寸为 4 500 mm，将试件放置在间距为 4 500 mm 的简支支座上，试件两端伸出长度相等，将装有 100 kg、粒径 2 mm 以下细

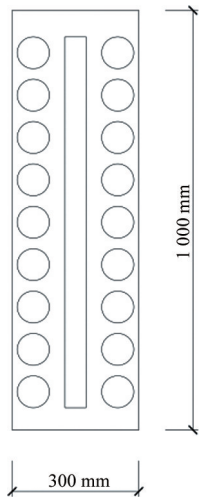


图 5 抗压强度试件
Fig. 5 Specimen of compressive strength

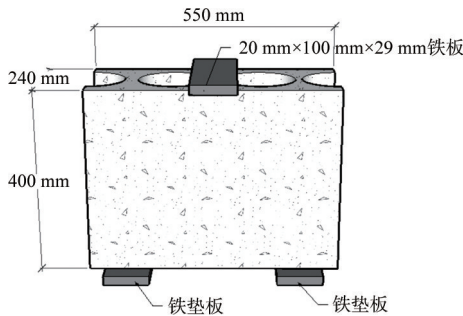


图 6 抗剪强度试件
Fig. 6 Specimen of shear strength

砂的砂袋在距离试件高 1 m 处自由落下，反复 3 次，目测试件上、下两面无贯穿裂缝，记录试验结果，如图 7 所示。

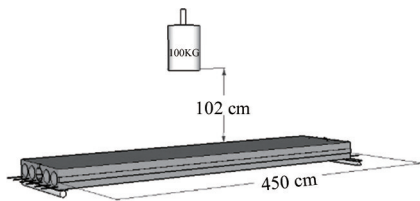


图 7 抗冲击性能试验
Fig. 7 Impact resistance test

3.1.4 干燥收缩

试件沿墙板板长方向截取，即长度为 60 mm、长度为板宽的试件三件，为一组样本。在每件试件两个端面中心各钻一个直径 6 mm、深度 14 mm 的孔洞，在孔洞内灌入水泥浆，然后埋置收缩头如图 8 所示，使每个收缩头的中心线均与试件的中心线重合，且使收缩头露在试件外的长度 η_1 及 η_2 均在 4~6 mm 之间。

材料科学

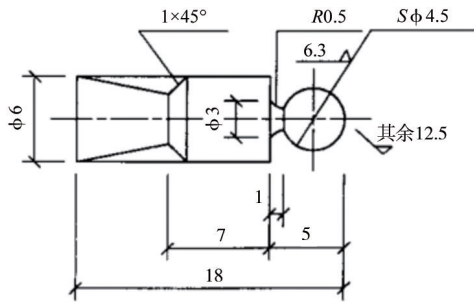


图 8 干燥收缩测试头
Fig. 8 Drying shrinkage test fitting

试件制备好放置 1 d 之后, 检查测头是否安装牢固, 否则重新安装。将制备好的试件浸没在 20 ± 2 °C 的水中, 水面高出试件 20 mm, 浸泡 72 h。

将试件从水中取出, 用拧干的湿布抹去表面水分, 并将测头擦干净, 立刻采用精度为 0.002 mm 的万能测长仪测定初始长度 l_1 。

将试件放入温度 20 ± 1 °C, 相对湿度 $(50 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿室内, 进行收缩值测量, 每天测量一次, 直至达到干缩平衡, 即连续 3 d 内任意 2 d 的测长读数波动值小于 0.01 mm, 量出试件干燥后的长度 l_2 。

试件干燥收缩值计算公式为:

$$S = \frac{l_1 - l_2}{l_1 - (\eta_1 + \eta_2)} \times 1000 \quad (1)$$

式中: S 为干燥收缩值, mm/m; l_1 为试件初始长度, mm; l_2 为试件干燥后长度, mm; $\eta_1 + \eta_2$ 为两个收缩头在试件外的部分测头的长度之和, mm。

3.2 试验结果分析

3.2.1 抗压强度

由图 9 可知, 建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度为 7.78 MPa, 蒸压加气块砌体抗压强度为 4.29 MPa, 预制轻混凝土墙板抗压强度为 5.00 MPa^[17]。

与蒸压加气块砌体抗压强度相比, 建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度约为其 1.81 倍, 上升 81.4%; 与预制轻混凝土墙板抗压强度相比, 建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度约为其 1.56 倍, 上升 55.6%。

3.2.2 抗剪强度

建筑垃圾再生骨料预制条板抗剪强度为 0.50 MPa。

3.2.3 抗冲击性能

建筑垃圾再生骨料预制条板 3 次 100 kg 沙袋冲

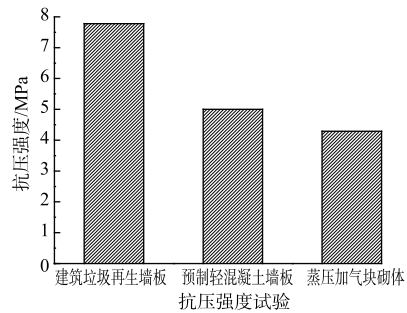


图 9 抗压强度试验结果
Fig. 9 Test results of compressive strength

击后, 板正反两面无明显裂缝。

3.2.4 干燥收缩

由图 10 可知, 建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩值为 0.51 mm/m, 蒸压加气墙板干燥收缩值 0.47 mm/m, 预制轻混凝土墙板干燥收缩值 0.60 mm/m。

与蒸压加气墙板干燥收缩值相比, 建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩值约为其 1.09 倍, 上升 8.5%; 与预制轻混凝土墙板相比, 建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩值为其 85%, 下降 15%。

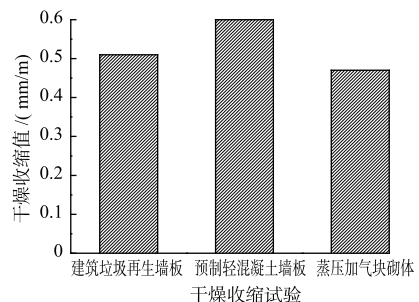


图 10 干燥收缩试验结果
Fig. 10 Test results of drying shrinkage

3.3 试验结论

建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度优于市场上主流的蒸压加气墙板和预制轻混凝土墙板两类墙材。建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度约为蒸压加气块砌体的 1.81 倍, 约为预制轻混凝土墙板的 1.56 倍, 三类墙板均满足标准规范中对预制墙板的抗压强度要求。

建筑垃圾再生骨料预制条板抗剪强度为 0.50 MPa, 满足标准规范中对建筑垃圾再生骨料预制条板抗剪强度的要求。

建筑垃圾再生骨料预制条板 3 次 100 kg 沙袋冲击后, 板正反两面无明显裂缝, 满足标准规范中对

建筑垃圾再生骨料预制条板抗冲击性能的要求。

建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩优于预制轻混凝土墙板，为预制轻混凝土墙板干燥收缩值的 85%；建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩略逊于蒸压加气墙板，为蒸压加气墙板干燥收缩值的 109%，三类墙板均满足标准规范中对预制墙板的抗压强度要求。

4 结论及建议

通过对生骨料表观密度、泥块含量、压碎指标、质量损失率、颗粒级配试验研究，预制条板抗压强度、抗剪强度、抗冲击性能和干燥收缩试验研究，得出如下结论：

(1) 再生骨料工作性能。

再生骨料在表观密度和颗粒级配方面与天然骨料差距较小，再生骨料表观密度在 $2\,300\sim 2\,500\text{ kg/m}^3$ 范围内，与天然骨料相比低 12% 左右；相同粒径尺寸再生骨料筛余量与天然骨料筛余量相比差距最大在 20% 左右。

再生骨料在泥块含量、压碎指标和质量损失率方面与天然骨料差距较大，再生骨料泥块含量在 0.3%~1.2% 范围内，与天然骨料相比高 200%~300% 左右；再生骨料压碎指标在 15%~25% 范围内，与天然骨料相比高 180% 左右；再生骨料坚固性在 11%~12% 范围内，与天然骨料相比低 290%~570% 左右。

(2) 建筑垃圾再生骨料预制条板工作性能。

建筑垃圾再生骨料预制条板抗压强度为 7.78 MPa，优于市场上主流的蒸压加气墙板和预制轻混凝土墙板两类墙材。再生骨料条板，蒸压加气块砌体和预制轻混凝土抗压强度比值约为 1:0.55:0.64；

建筑垃圾再生骨料预制条板抗剪强度、抗冲击性能均满足标准规范中对建筑垃圾再生骨料预制条板相应工作性能的要求，满足建筑工程使用条件；

建筑垃圾再生骨料预制条板干燥收缩值为 0.51 mm/m。再生骨料条板，蒸压加气块砌体和预制轻混凝土干燥收缩值比值约为 1:0.92:1.18。

(3) 使用建议

再生骨料部分工作性能与天然骨料工作性能差距较小，建筑垃圾再生骨料预制条板工作性能与目前市场上主流的墙材工作性能差距不大，甚至部分

性能优于目前市场上主流的墙材。

在“碳达峰、碳中和”和“乡村振兴”等政策背景下，建筑垃圾再生骨料预制条板属于装配式构件，具有规范、统一高效的优势，同时利用建筑垃圾作为骨料，减少碳排放、降低造价成本，可用于农村自建房的建造使用。

参 考 文 献

- [1] 白宇, 卫嘉. 中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见 [N]. 人民网, 2024.
- [2] 国务院办公厅转发住房城乡建设部《关于进一步加强城市建筑垃圾治理的意见》的通知 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2025 (18): 16-19.
- [3] 毛宁. 建筑垃圾再生混凝土设计制备、优化及其性能研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2025.
- [4] 张蒙. 再生混凝土力学及耐久性能研究 [D]. 合肥: 合肥大学, 2024.
- [5] 王铁山, 张建鹏, 纪锋, 等. 再生混凝土抗折强度尺寸效应研究 [J]. 北方建筑, 2023, 8 (3): 7-11.
- [6] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2004 (12): 1558-1561.
- [7] Verian K P, Ashraf W, Cao Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 133: 30-49.
- [8] 曾威振. 隔墙板用免蒸压轻质多孔混凝土的试验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [9] 高博. 建筑再生微粉的性能与应用研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [10] 马加存, 杨永富, 段淑芸, 等. 混合再生细骨料水泥砂浆性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (9): 92-94.
- [11] 元成方, 李爽, 曾力, 等. 砖砗混合再生粗骨料混凝土力学性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (2): 398-402.
- [12] 高旭, 王宁. 再生混凝土抗压强度试验研究 [J]. 水泥工程, 2020 (4): 29-30.
- [13] 王铁山, 张建鹏, 纪锋, 等. 再生混凝土抗折强度尺寸效应研究 [J]. 北方建筑, 2023, 8 (3): 7-11.
- [14] 康转转. 再生混凝土力学性能试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [15] 李秋义, 李云霞, 朱崇绩. 颗粒整形对再生粗骨料性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2005 (6): 579-581, 585.
- [16] 李滢, 代大虎, 余红发. 再生细骨料对再生混凝土力学性能及耐久性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2016 (12): 76-7.
- [17] 吕超. 轻质条板填充墙 RC 框架结构抗震性能研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.