

再生骨料掺量与硅灰添加量对再生骨料混凝土性能影响的研究

柳汉庆

中国建筑第二工程局有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月12日; 录用日期: 2025年8月2日; 发布日期: 2025年8月14日

摘要

本研究通过实验深入探究再生骨料掺量与硅灰添加量对再生骨料混凝土抗压强度、抗拉强度、粘结强度和孔隙率的影响。实验结果表明, 再生骨料掺量增加会降低混凝土抗压、抗拉、粘结强度并增大孔隙率, 而适量添加硅灰可有效改善这些性能。研究成果为再生骨料混凝土在实际工程中的合理应用提供重要参考依据。

关键词

再生骨料混凝土, 再生骨料掺量, 硅灰添加量, 力学性能, 孔隙率

Study on the Influence of Recycled Aggregate Content and Silica Fume Content on the Performance of Recycled Aggregate Concrete

Hanqing Liu

China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 12th, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 14th, 2025

Abstract

In this study, the effects of recycled aggregate content and silica fume content on compressive strength, tensile strength, bond strength and porosity of recycled aggregate concrete were investigated. The experimental results show that the compressive strength, tensile strength and bond strength of concrete can be decreased and the porosity can be increased with the increase of recycled aggregate content, and the appropriate addition of silica fume can effectively improve these

properties. The research results provide an important reference for the rational application of recycled aggregate concrete in practical engineering.

Keywords

Recycled Aggregate Concrete, Recycled Aggregate Content, The Amount of Silica Fume Added, Mechanical Properties, Porosity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球建筑行业的蓬勃发展, 各类建筑工程如雨后春笋般不断涌现, 这使得对建筑材料的需求呈现出持续且迅猛的增长态势。在众多建筑材料中, 天然骨料作为混凝土的关键组成部分, 其用量巨大。然而, 长期的大量开采导致天然骨料资源日益紧张, 许多地区甚至面临着资源枯竭的严峻问题。与此同时, 大量建筑废弃物的产生也给环境带来了沉重的负担。据统计, 每年因建筑拆除、翻新等活动产生的建筑废弃物数量惊人, 这些废弃物不仅占用大量土地资源, 还可能对土壤、水源和空气等造成污染, 引发一系列严重的环境问题。

在此背景下, 将废弃混凝土加工成再生骨料并用于制备混凝土, 成为了解决资源与环境问题的有效途径之一[1]-[4]。这种做法不仅能够缓解天然骨料资源短缺的困境, 减少对自然资源的过度依赖, 还能降低建筑废弃物对环境的负面影响, 具有显著的经济和环境效益。

然而, 再生骨料的特性与天然骨料存在诸多差异。再生骨料表面往往附着有旧水泥砂浆, 这些旧砂浆会影响再生骨料与新水泥浆体之间的粘结性能; 同时, 再生骨料内部还存在微裂缝等缺陷, 这些因素都会对再生骨料混凝土的性能产生不利影响, 例如导致混凝土的强度降低、耐久性变差等。为了更好地利用再生骨料混凝土, 充分发挥其优势, 深入研究其性能的影响因素, 并探索有效的改善措施显得尤为重要。

硅灰作为一种高性能矿物掺合料[5]-[9]细小、活性高的显著特点。其平均粒径通常在 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 之间, 比表面积很大, 这使得硅灰具有极高的火山灰活性。在混凝土中添加硅灰后, 硅灰能够与水泥水化过程中产生的氢氧化钙发生反应, 生成具有胶凝性的水化硅酸钙凝胶。这种凝胶可以填充在混凝土的孔隙中, 细化孔隙结构, 从而提高混凝土的密实度。同时, 硅灰还能改善再生骨料与水泥浆体之间的界面过渡区, 增强两者之间的粘结力, 进而提高混凝土的力学性能。因此, 研究再生骨料掺量与硅灰添加量对再生骨料混凝土性能的影响具有重要的现实意义, 能够为再生骨料混凝土在实际工程中的广泛应用提供有力的理论支持和技术指导。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本实验选用普通波特兰水泥, 其各项性能指标满足实验要求, 能为混凝土提供稳定的胶凝作用。细骨料采用天然硅质砂, 细度模数为 2.63, 吸水率约 1.6%, 该砂级配良好, 有利于填充骨料间的空隙, 提高混凝土的密实度。粗骨料选用最大粒径为 20 mm 的粉红色石灰石作为天然粗骨料, 同时采用来自建筑工地废弃物的粗再生骨料。这些再生骨料由不同配合比、水泥类型和龄期的混凝土经人工钢锤破碎后,

筛选至符合 19~4.75 mm 的粒径范围。实验还使用了硅灰，其主要化学成分为二氧化硅，具有较高的活性。此外，采用高效减水剂来调节混凝土的工作性能，确保混凝土在搅拌、浇筑过程中具有良好的流动性和可塑性。

不同骨料的筛分曲线见图 1。从图中可以清晰地看出，天然粗骨料的粒径分布相对集中，级配较为理想；再生粗骨料的粒径分布范围较宽，这是由于其来源复杂，破碎过程难以精确控制粒径。天然砂的细度模数适中，能较好地填充粗骨料之间的空隙，为混凝土提供良好的工作性能和力学性能基础。

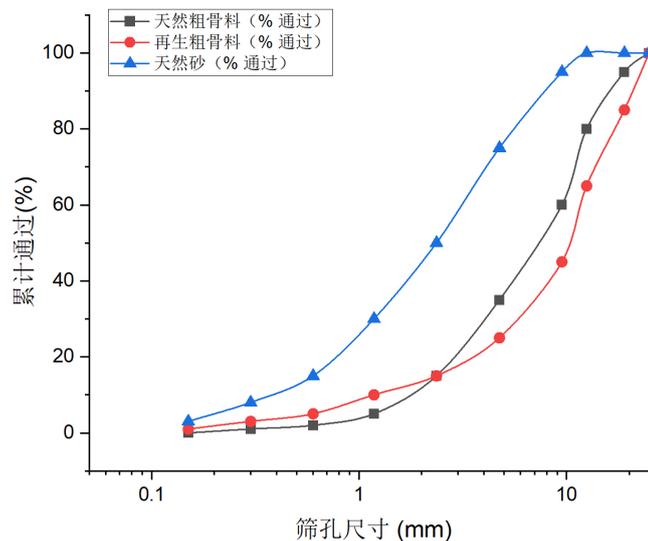


Figure 1. Screening curves of different aggregates
图 1. 不同骨料的筛分曲线

2.2. 实验设计

本实验主要研究再生骨料掺量和硅灰添加量对再生骨料混凝土性能的影响。再生骨料掺量设置为 0%、25%、50%、75%、100% 五个等级，以探究不同掺量下混凝土性能的变化规律。硅灰添加量仅针对水泥用量为 250 kg/m^3 、水灰比为 0.60 的混凝土进行研究，添加量为水泥质量的 10%，旨在分析硅灰在特定配合比下对混凝土性能的改善效果。

实验中，水泥用量分别设定为 400 kg/m^3 和 250 kg/m^3 ，分别代表钢筋混凝土构件和素混凝土构件的典型配合比。化学外加剂的用量根据水泥用量进行调整，水泥用量为 250 kg/m^3 时，外加剂用量为水泥重量的 1.75%；水泥用量为 400 kg/m^3 时，外加剂用量为水泥重量的 0.75%。通过严格控制外加剂用量，使所有混凝土混合料的工作度均控制在 $120 \pm 30 \text{ mm}$ ，以保证实验结果的准确性和可比性。

2.3. 实验方法

2.3.1. 试件制备

按照设计好的配合比准确称量各原材料。在搅拌过程中，采用常规搅拌方法，将水泥、骨料、硅灰、外加剂和水依次加入搅拌机中，搅拌均匀。搅拌完成后，将混凝土混合料倒入相应的模具中。抗压强度测试采用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体试件；抗拉强度测试采用直径为 75 mm、高度为 150 mm 的圆柱体试件；粘结强度测试采用直径为 150 mm、高度为 150 mm 的圆柱体试件，并在试件中心预埋直径为 16 mm 的变形钢筋；孔隙率测试采用 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体试件。试件成型后，在标准养护条件(温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 95% 以上)下养护至规定龄期。

2.3.2. 性能测试

抗压强度按照规定龄期(7天、28天、56天),将试件放置在压力试验机上,以恒定的加载速率施加压力,直至试件破坏,记录破坏荷载,并根据公式计算抗压强度。

抗拉强度采用劈裂拉伸试验方法,在规定龄期,通过劈裂夹具对圆柱体试件施加均匀的压力,使试件沿直径方向劈裂,记录破坏荷载,根据相应公式计算劈裂抗拉强度。

粘结强度在28天龄期,通过拉伸试验测定钢筋与混凝土之间的粘结力,从而得到粘结强度。

孔隙率在56天龄期,将试件烘干至恒重,称取干重,然后将试件浸泡在水中至饱和面干状态,称取饱和面干重,通过测量试件在干燥前后的质量和体积变化,计算出试件的孔隙率。

3. 结果及分析

3.1. 再生骨料掺量的影响

3.1.1. 抗压强度

水泥用量为 400 kg/m^3 ,不同再生骨料掺量对混凝土抗压强度的影响见图2。

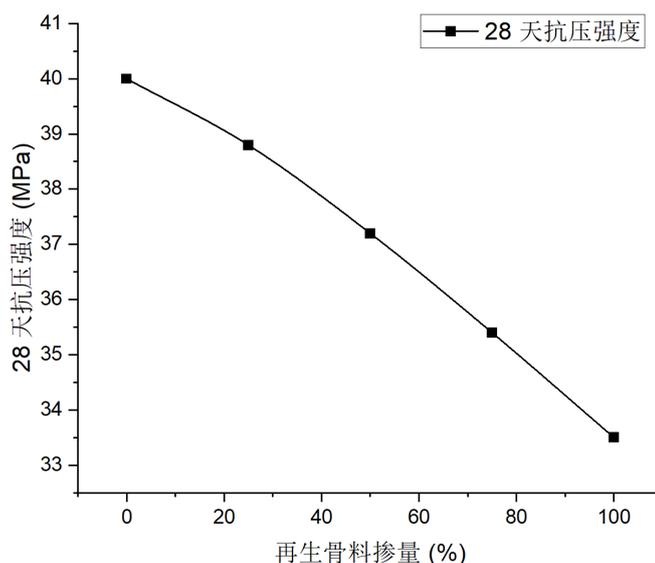


Figure 2. Compressive strength of concrete with different recycled aggregate content
图2. 不同再生骨料掺量对混凝土抗压强度

从图中可以看出,当再生骨料掺量不超过25%时,混凝土的抗压强度与未掺再生骨料的对照组相比,变化不明显。掺25%再生骨料时,28天抗压强度较对照组仅降低了3.0%。这是因为在低掺量下,再生骨料能够较好地分散在混凝土中,与天然骨料协同工作,且实验对再生骨料的级配进行了有效控制,使得混凝土内部结构较为密实。

然而,当再生骨料掺量超过25%后,抗压强度呈现明显下降趋势。掺50%、75%、100%再生骨料时,28天抗压强度较对照组分别降低了7.1%、11.6%、16.2%。这主要是由于再生骨料表面附着的旧水泥砂浆降低了其与新水泥浆体的粘结强度,随着再生骨料掺量的增加,这种不利影响逐渐累积,导致混凝土内部结构的整体性变差,在承受压力时更容易产生裂缝和破坏,从而降低了抗压强度。

3.1.2. 抗压强度

水泥用量为 250 kg/m^3 时,再生骨料掺量对混凝土抗拉强度的影响见图3。随着再生骨料掺量的增加,

混凝土的抗拉强度逐渐降低。当再生骨料掺量从 0 增加到 100% 时, 28 天抗拉强度从 2.35 MPa 降低到 1.41 MPa。这是因为再生骨料与新水泥浆体之间的界面过渡区相对薄弱, 在承受拉力时, 界面处容易产生微裂缝, 且这些微裂缝会随着再生骨料掺量的增加而更容易扩展, 从而降低了混凝土的抗拉强度。

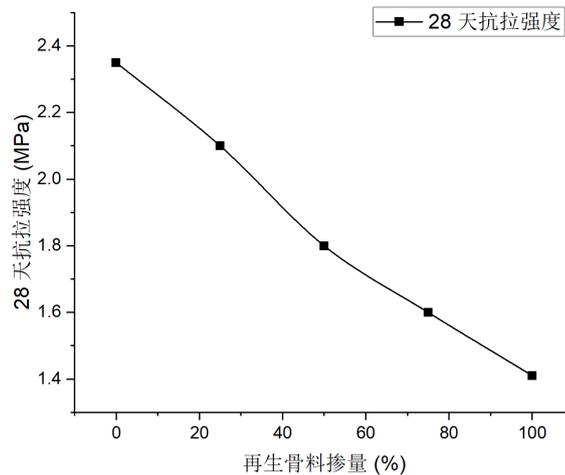


Figure 3. Effect of different recycled aggregate content on tensile strength of concrete
图 3. 不同再生骨料掺量对混凝土抗拉强度

3.1.3. 粘结强度

水泥用量为 400 kg/m^3 时, 再生骨料掺量对 28 天粘结强度的影响见图 4。从图中可以明显看出, 随着再生骨料掺量的增加, 粘结强度逐渐降低。这是因为再生骨料表面的旧水泥砂浆影响了其与钢筋之间的粘结性能, 使得钢筋与混凝土之间的握裹力减弱。当再生骨料掺量为 100% 时, 粘结强度较未掺再生骨料时降低了约 20%。

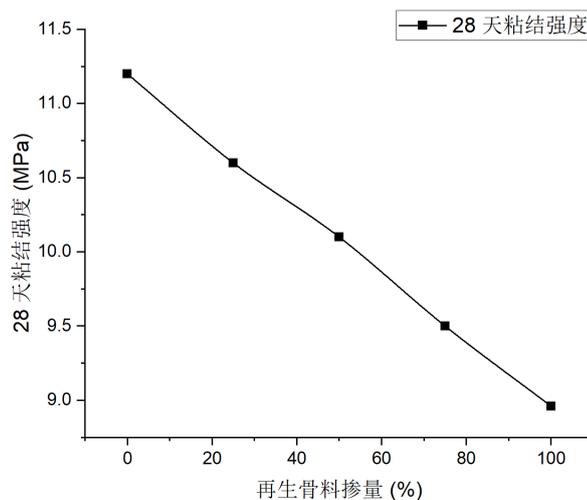


Figure 4. Bond strength of concrete with different recycled aggregate content
图 4. 不同再生骨料掺量对混凝土粘结强度

3.1.4. 孔隙率

水泥用量为 400 kg/m^3 时, 再生骨料掺量对混凝土孔隙率的影响见图 5。随着再生骨料掺量的增加,

混凝土的孔隙率逐渐增大。这是由于再生骨料在加工过程中会产生裂缝和裂隙，这些缺陷使得骨料更容易吸收水分和气体，从而增加了混凝土的孔隙率。当再生骨料掺量从 0 增加到 100% 时，混凝土的孔隙率增加了约 10%。孔隙率的增大降低了混凝土的密实度，进而影响了混凝土的力学性能和耐久性。

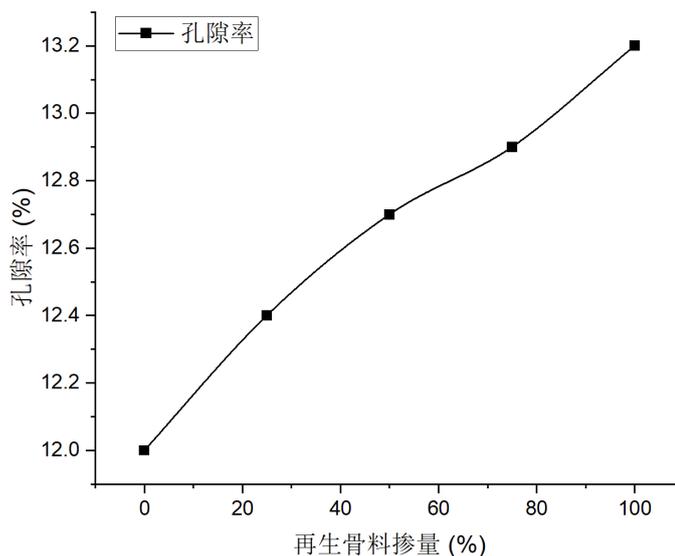


Figure 5. Concrete porosity with different recycled aggregate content
图 5. 不同再生骨料掺量的混凝土孔隙率

3.2. 硅灰添加量的影响

3.2.1. 抗压强度

硅灰添加量对混凝土抗压强度的影响见表 1。在水泥用量为 250 kg/m^3 、水灰比为 0.60 的混凝土中添加 10% 硅灰后，抗压强度有显著提升。以再生骨料掺量为 25% 的混凝土为例，未添加硅灰时，28 天抗压强度为 26.7 MPa，添加硅灰后提升至 34.1 MPa，提高了 27.7%。对于再生骨料掺量为 75% 的混凝土，抗压强度从 21.5 MPa 提升至 29.5 MPa，提高了 37.2%。这是因为硅灰的颗粒细小，能够填充水泥浆体和骨料之间的孔隙，提高混凝土的密实度；同时，硅灰具有较高的火山灰活性，能够与水泥水化产生的氢氧化钙发生二次反应，生成更多的水化硅酸钙凝胶，增强了混凝土的胶凝结构，从而提高了抗压强度。

Table 1. Effect of silica fume addition on compressive strength of concrete

表 1. 硅灰添加量对混凝土抗压强度影响

水泥用量(kg/m^3)	再生骨料掺量(%)	未添加硅灰时 28 天 抗压强度(MPa)	添加 10% 硅灰后 28 天 抗压强度(MPa)	抗压强度提升百分比(%)
250	25	26.7	34.1	27.7
250	75	21.5	29.5	37.2

3.2.2. 抗拉强度

硅灰添加量对混凝土抗拉强度的影响也较为显著，具体数据见表 2。水泥用量为 250 kg/m^3 时，添加 10% 硅灰后，再生骨料混凝土的抗拉强度得到明显提高。以再生骨料掺量为 25% 的混凝土为例，28 天抗拉强度从 2.18 MPa 提高到 2.53 MPa，提升了 16.1%；再生骨料掺量为 75% 的混凝土，抗拉强度从 1.41 MPa 提高到 2.06 MPa，提升了 46.1%。硅灰的添加改善了混凝土内部的微观结构，增强了水泥浆体与骨

料之间的粘结力，使得混凝土在承受拉力时能够更好地抵抗裂缝的产生和扩展，从而提高了抗拉强度。

Table 2. Effect of silica fume addition on tensile strength of concrete

表 2. 硅灰添加量对混凝土抗拉强度的影响

水泥用量(kg/m ³)	再生骨料掺量(%)	未添加硅灰时 28 天抗拉强度(MPa)	添加 10%硅灰后 28 天抗拉强度(MPa)
250	0	2.35	2.74
250	25	2.18	2.53
250	50	1.84	2.24
250	75	1.41	2.06
250	100	1.32	1.97

3.2.3. 粘结强度

添加 10%硅灰对再生骨料混凝土 28 天粘结强度有一定的提升作用。从实验来看，再生骨料掺量为 25%时，粘结强度从 10 MPa 提高到 11.1 MPa，提高了 11.0%；再生骨料掺量为 75%时，粘结强度从 9.9 MPa 提高到 10.2 MPa，提高了 3.0%。硅灰的火山灰反应产物填充了钢筋与混凝土之间的微小孔隙，增强了界面的粘结性能，从而提高了粘结强度。

3.2.4. 孔隙率

硅灰的添加能够有效降低再生骨料混凝土的孔隙率。从实验结果可知，再生骨料掺量为 25%时，未添加硅灰的混凝土孔隙率为 15.1%，添加硅灰后降低至 13%，降低了 13.9%；再生骨料掺量为 75%时，孔隙率从 16.2%降低至 15.1%，降低了 6.8%。硅灰的细小颗粒填充了混凝土中的孔隙，减少了大孔的数量，优化了孔隙结构，提高了混凝土的密实度，进而降低了孔隙率。

4. 结语

本实验研究了再生骨料掺量与硅灰添加量对再生骨料混凝土抗压强度、抗拉强度、粘结强度和孔隙率的影响，得出以下结论：

(1) 再生骨料掺量对混凝土性能有显著影响。当再生骨料掺量不超过 25%时，对混凝土抗压强度影响较小；超过 25%后，抗压强度明显下降。同时，随着再生骨料掺量的增加，混凝土的抗拉强度、粘结强度逐渐降低，孔隙率逐渐增大。

(2) 在水泥用量为 250 kg/m³、水灰比为 0.60 的再生骨料混凝土中添加 10%硅灰，能够显著提高混凝土的抗压强度、抗拉强度和粘结强度，同时降低孔隙率。硅灰通过填充孔隙和火山灰反应，改善了混凝土的微观结构和内部性能。

(3) 综合考虑，在实际工程应用中，应合理控制再生骨料的掺量，对于强度要求较高的结构，再生骨料掺量不宜超过 25%。同时，可通过添加适量硅灰来改善再生骨料混凝土的性能，提高其在工程中的适用性和可靠性。

参考文献

- [1] 游帆, 念梦飞, 郑建岚, 等. 再生骨料混凝土弯曲疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 134-141.
- [2] 张晓飞, 姜雄浩, 刘钰婷, 等. 再生骨料混凝土抗压强度影响因素分析的正交试验与数值模拟[J]. 水电能源科学, 2025, 43(1): 93-98, 107.
- [3] 刘佳伟, 葛序尧, 梁汝鸣, 等. 再生骨料混凝土结构的经济性分析[J]. 建筑经济, 2023, 44(S2): 469-472.

-
- [4] 元成方, 李好飞, 郭稼祥. 纳米硅溶胶改性混合再生骨料混凝土的力学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4): 580-584.
- [5] 陈超, 孙振平. 硅灰对掺有无碱速凝剂水泥浆体性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2348-2353.
- [6] 赵新星, 扈惠敏. 硅灰对水泥胶砂抗折抗压强度的影响[J]. 工程与建设, 2021, 35(3): 598-599, 606.
- [7] 李建权, 许红升, 谢红波, 等. 硅灰改性水泥/石灰砂浆微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2006(4): 66-71.
- [8] 杨文武, 钱觉时, 黄煜缤. 海洋环境下硅灰混凝土的抗冻性与氯离子扩散性[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(2): 158-162.
- [9] 刘亚炜, 胡阳, 罗琦, 等. 低温环境下硅灰对掺无碱速凝剂水泥砂浆抗压强度和抗渗性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3273-3281.