

钢纤维对再生骨料混凝土的力学性能研究

吴杨飞^{1*}, 马 斌², 周延波¹

¹西京学院土木工程学院, 陕西 西安

²西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年1月4日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年2月18日

摘 要

为研究钢纤维对再生骨料混凝土力学性能和工作性能的影响,通过掺加体积分数0、0.8%、1.2%、1.6%、2.0%的钢纤维开展抗压试验、劈裂抗拉、抗折试验和坍落度的研究,探讨在不同钢纤维掺量下的再生骨料混凝土的力学性能的变化规律。结果表明:随着钢纤维掺量的增加,坍落度持续降低;抗压强度先呈现先增大后减小,且抗压强度值均高于对照组,当钢纤维为0.8%掺量时,达到了最大值,抗压强度提高了10.66%;当钢纤维为1.2%掺量时,劈裂抗拉与抗折强度相较于对照组,劈裂抗拉最大值达到3.91 MPa,提高了32.54%,抗折强度达到了最大值8.1 MPa,提高了42.11%。适量添加钢纤维不仅可以改善了再生骨料混凝土的流动性,还能提高抗压、劈裂抗拉和抗折强度,且可以改善再生骨料混凝土早期强度。

关键词

钢纤维, 再生骨料混凝土, 抗压强度, 劈裂抗拉强度, 抗折强度

Study on the Mechanical Properties of Steel Fiber on Recycled Aggregate Concrete

Yangfei Wu^{1*}, Bin Ma², Yanbo Zhou¹

¹School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

²Shanxi Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jan. 4th, 2024; accepted: Jan. 31st, 2024; published: Feb. 18th, 2024

Abstract

In order to study the influence of steel fiber on the mechanical properties and working properties of recycled aggregate concrete, the compression test, splitting tensile test, folding test and slump test were carried out by adding steel fiber with volume fraction of 0, 0.8%, 1.2%, 1.6% and 2.0%,

*通讯作者。

文章引用: 吴杨飞, 马斌, 周延波. 钢纤维对再生骨料混凝土的力学性能研究[J]. 土木工程, 2024, 13(2): 131-138.

DOI: 10.12677/hjce.2024.132017

and the change rule of mechanical properties of recycled aggregate concrete under different steel fiber content was discussed. The results show that with the increase of steel fiber content, slump decreases continuously. The compressive strength increased first and then decreased, and the compressive strength value was higher than that of the control group. When the steel fiber content was 0.8%, the maximum compressive strength was reached, and the compressive strength was increased by 10.66%. When the steel fiber content is 1.2%, the maximum splitting tensile strength and flexural strength are 3.91 MPa, an increase of 32.54%, and the maximum flexural strength is 8.1 MPa, an increase of 42.11%. Appropriate addition of steel fiber can not only improve the fluidity of recycled aggregate concrete, but also improve the compressive, splitting tensile and flexural strength, and improve the early strength of recycled aggregate concrete.

Keywords

Steel Fiber, Recycled Aggregate Concrete, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Flex-Ural Strength

Copyright © 2024 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

再生骨料混凝土(RAC)是一种具有环保特性的建筑材料,通过回收再利用废弃混凝土或其他建筑废料作为骨料,可减少天然资源的依赖和建筑废弃物对环境的影响[1] [2]。随着我国建筑业逐渐发展,对于混凝土强度有了更高的要求[3] [4],而再生骨料的不均一性和颗粒形状的不规则性,使再生骨料混凝土在力学性能上受到严峻的挑战[5] [6]。

为了克服再生骨料混凝土的力学性能上的不足,不少学者对再生骨料混凝土的胶凝材料进行了改性,来补充再生骨料混凝土力学性能上的缺陷,其中采用纳米硅溶胶与粉煤灰复合取代再生骨料混凝土的凝胶部分,可以加快其水化的反应,从而提高了水化硅酸钙的含量,填充了其内部的孔隙和裂缝,使力学性能得到显著提升[7]。通过粉煤灰和矿渣改性再生骨料混凝土,可以改善其工作性能提高,但对其弹性模量和抗压强度却有负面影响[8]。通过钢渣替代再生骨料混凝土的部分凝胶材料,试验表明,在12%时含量时,可以提高再生骨料混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度,在12%~24%含量以内可以较好的提高其抗变形能力[9]。

再生骨料混凝土的骨料粒径和替代率是影响力学性能的主要原因之一,为寻求更优异的再生骨料混凝土。陈鹏博等[10]发现随着再生粗骨料取代粒径增大,再生混凝土的坍落度,抗压强度、抗折强度与弹性模量基本呈增大趋势。而张恺等[11]通过微观试验和力学性能试验,结果表明,再生粗骨料的替代率为30%时,再生混凝土各项力学性能达到最优。此外,通过对再生细骨料和粗骨料进行替换成其他建筑废弃材料来弥补再生骨料混凝土的不足也有颇有研究。许颖等[12]试验结果表明,废弃卫生陶瓷细骨料替代率的增加,再生骨料混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度呈现先升高后降低趋势,其中替代率为70%、60%时分别达到最大抗压强度和最大劈裂抗拉强度,且再生细骨料的添加对RAC的弹性模量基本无影响。张鹏[13]利用废砖取代部分再生粗骨料制备再生骨料混凝土,发现水灰比为0.4时,RAC抗压强度达到最大值。

如今,掺入其他高性能、高强度材料来提高再生骨料混凝土力学性能的研究颇受欢迎。周金枝等[14]通过添加玄武岩纤维进行改善再生混凝土,发现玄武岩纤维的掺入可显著提高RAC疲劳寿命。而姚红利等[15]以玄武岩纤维为基础,掺入了废陶瓷来取代再生粗骨料,结果表示,废陶瓷取代率和纤维体积掺量

分别为 40% 和 0.15% 时, RAC 试件力学性能和透水性能最佳。吴辉琴等[16]将不同掺量的碳纤维掺入 RAC 中, 发现 RAC 的应力和应变得到不同程度的提升, 其中碳纤维体积掺量为 0.3% 时, 峰值应力和峰值应变分别提高了 11.33% 和 12.22%。

上述研究基本上都停留在将废弃建筑材料和玄武岩纤维等材料掺入再生混凝土内, 而将不同掺量的钢纤维作为掺量用来制备再生混凝土的研究较少。鉴于此, 本文将研究不同掺量的钢纤维对再生骨料混凝土力学性能与工作性能的影响, 通过抗压、劈裂抗拉和抗折、坍落度等试验进行分析, 揭示不同钢纤维对再生骨料混凝土力学性能和工作性能, 为再生骨料混凝土的改善提供技术支持。

2. 原材料及试验方案

2.1. 原材料

试验采用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥, 其化学成分见表 1; 细砂采用的是陕西灞河河砂, 表观密度 2640 kg/m^3 , 堆积密度 1490 kg/m^3 , 细度模数 2.83; 粉煤灰采用的是 I 级粉煤灰, 其化学成分和主要物理性能见表 2 和表 3; 减水剂采用的是高效缓凝减水剂, 其技术指标如表 4 所示; 钢纤维采用的剪切波浪型钢纤维, 平均长度 37 mm, 平均直径 1 mm, 抗拉强度 400 MPa, 密度 7.83 g/cm^3 ; 再生粗骨料是废弃 1 年以上的强度等级为 C35 的混凝土梁柱构件以上, 通过机械破碎的方式得到的, 粒径范围为 5 mm~25 mm, 其表观密度 2630 kg/m^3 , 堆积密度 1550 kg/m^3 , 吸水率为 4.05%; 试验用水为自来水。

Table 1. Chemical composition of cement

表 1. 水泥的化学成分组成

SiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	SO ₃ /%	碱含量/%	烧失量/%
22.81	3.36	5.62	61.43	1.35	1.78	0.54	2.60

Table 2. Chemical composition of fly ash

表 2. 粉煤灰的化学成分组成

SiO ₂ /%	Fe ₂ O ₃ /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%	Na ₂ O、K ₂ O/%
22.81	6.97	31.56	4.88	0.83	1.78

Table 3. Physical property index of fly ash

表 3. 粉煤灰的物理性能指标

细度/%	需水量比/%	烧失量/%	含水量/%	SO ₃ /%
22.81	6.97	31.56	4.88	0.83

Table 4. Technical index of water reducing agent

表 4. 减水剂的技术指标

外观	减水率/%	PH 值	水分/%	溶解性
白色片状	10~20	5.0~7.0	≤0.5	溶于水及多种有机物

2.2. 配合比设计

为探究钢纤维对再生骨料混凝土的力学性能的影响, 本试验设计了水胶比为 0.45, 再生粗骨料替代率为 100%, 砂率为 0.4 进行配合比设计, 其中以钢纤维为变量, 得到 5 种不同的再生骨料混凝土试件。经试拌调整后的配合比如表 5 所示。

Table 5. The mix ratio of each group was tested

表 5. 试验各组配合比

试件编号	水泥/kg/m ³	水/kg/m ³	砂子/kg/m ³	再生骨料/kg/m ³	减水剂/kg/m ³	钢纤维/%	粉煤灰/kg/m ³
S0RAC	346	164	712	1053	2	0	87.1
S0.8RAC	346	164	712	1053	2	0.8	87.1
S1.2RAC	346	164	712	1053	2	1.2	87.1
S1.6RAC	346	164	712	1053	2	1.6	87.1
S2.0RAC	346	164	712	1053	2	2.0	87.1

注：S0.8RAC 表示的是钢纤维掺量为 0.8% (占体积的百分数)的再生骨料混凝土。

2.3. 试件设计

试验设计采用规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2016), 设计了尺寸大小 100 mm × 100 mm × 100 mm 和 100 mm × 100 mm × 400 mm 的试件, 每组制作三个试块, 分别进行 3、7 和 28 天的标准养护, 养护天数结束便立刻进行力学性能试验。试验仪器采用 MTS 万能试验机进行劈裂抗拉试验、抗压试验和抗折试验。其中采用尺寸大小 100 mm × 100 mm × 100 mm 进行劈裂抗拉试验和抗压试验, 尺寸大小为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的试件进行抗折试验。

3. 结果与讨论

3.1. 坍落度

为研究钢纤维对再生骨料混凝土的和易性, 采用坍落度作为再生骨料混凝土的和易性指标, 对各配合比的混凝土进行了坍落度试验, 图 1 为各配合比的坍落度。从图 1 可以看出, 整体坍落度呈现下降趋势, 说明随着钢纤维的掺入, 再生骨料混凝土的流动性逐渐降低, 当未掺入钢纤维时, 再生骨料混凝土的最初的坍落度为 63 mm, 流动性较强, 而掺入体积数为 2.0% 的钢纤维后, 再生骨料混凝土的坍落度达到最小值 49 mm, 相较于 S0RAC 降低了 22.22%, 原因可能是钢纤维的条状物理性质, 阻碍了混凝土颗粒的自由移动, 从而减缓了混凝土的坍落。再次观察 S1.2RAC、S1.6RAC 和 S2.0RAC, 发现其坍落度下降幅度相较于 S0RAC 和 S0.8RAC 较小, 说明当钢纤维的摄入量达到 1.2% 及超过时, 降低混凝土的坍落度值就不再明显。

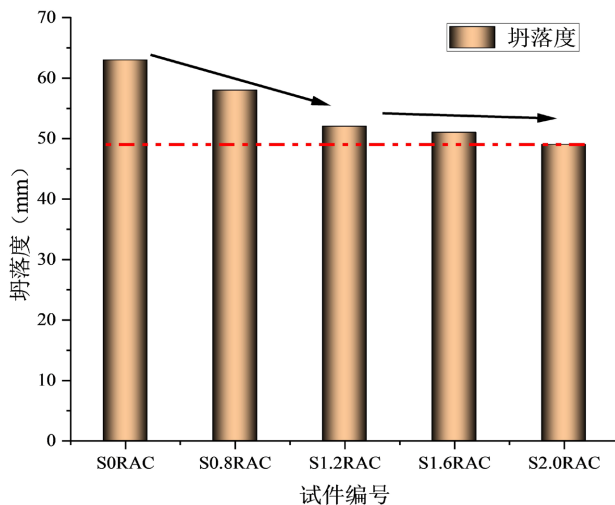


Figure 1. Slump of each mix ratio

图 1. 各配合比的坍落度

3.2. 抗压试验

为研究钢纤维对再生骨料混凝土的抗压强度的性能研究,各配合比试件的抗压强度如图 2 所示,从图 2 可以看出,发现整体趋势呈现先增加后降低,再次观察龄期 28 天发现,未掺入钢纤维时,再生骨料混凝土强度为 57.64 MPa。当钢纤维掺量为 0.8% 时,达到最大值 64.52 MPa,提高了 10.66%。随着继续添加钢纤维发现,再生骨料混凝土的强度逐渐下降,但均高于 S0RAC,说明钢纤维掺入可有效提高再生骨料混凝土的强度,原因可能是钢纤维的高强度物理性质与混凝土中的水泥基体充分结合,形成了一种强化结构,有助于增加混凝土的整体抗压性能。比较 3、7 和 28 天龄期发现,在龄期 3 天时,S0RAC 强度达到了最低值 34.4%,相较于龄期 7 天 S0RAC,抗压强度提升了 28.34%。S0RAC 的强度提升均高于其他掺入试件的抗压强度的提升率,但掺入钢纤维后的再生骨料混凝土强度,均高于同龄期的 S0RAC。说明掺入钢纤维可以提升再生骨料混凝土的早期强度,尤其是 S0.8RAC 体现的最为明显,说明钢纤维的加入促使再生骨料混凝土在早期获得更高的抗压强度,原因可能使钢纤维的高强度物理性质阻碍了前期水化时裂缝的扩展,从而提高了混凝土的早期抗压强度。

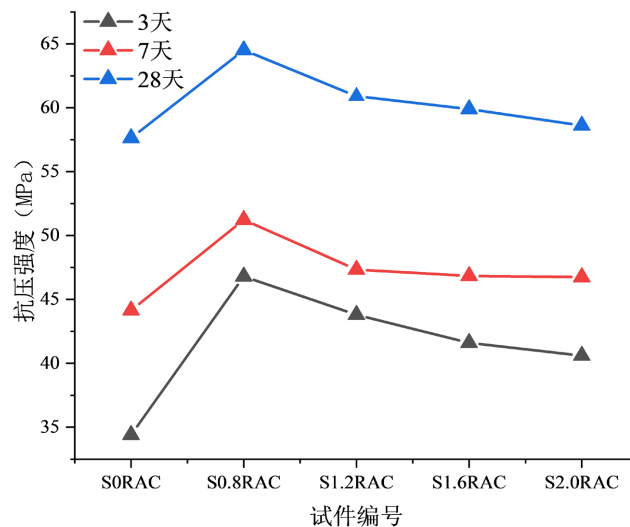


Figure 2. Compressive strength of each mix ratio specimen
图 2. 各配合比试件的抗压强度

3.3. 劈裂抗拉试验

为研究钢纤维对再生骨料混凝土的劈裂抗拉强度的性能研究,各配合比试件的劈裂抗拉强度如图 3 所示,从如图 3 可以看出,整体趋势呈现逐渐先增大后减少的趋势,其中各个龄期的整体趋势基本一致,说明劈裂抗拉试验的数据具有一定的可靠性。观察 3、7 和 28 天龄期数据,可以发现,随着龄期天数的增加,劈裂抗拉的强度也随着提高,其中 S0RAC 的 7 天与 28 天龄期强度相较于 3 天龄期强度,分别提高 16.91%、46.77%,而 S0.8RAC、S1.2RAC、S1.6RAC、S2.0RAC 在 7 天龄期时分别提升了 4.17%、4.98%、4.01%、与 2.54%,说明在 7 天龄期时,掺入钢纤维对劈裂抗拉强度提升并不明显,而 28 天龄期相较于 7 天龄期,钢纤维对再生骨料混凝土提升较为明显,分别提升了 17.42%、39.15%、28.26%与 22.63%。当掺入钢纤维后,同龄期的劈裂抗拉强度均获得不同程度的提高,说明钢纤维的掺入可以提高再生骨料混凝土劈裂抗拉强度。再次观察 28 天龄期,可以发现 S0.8RAC、S1.2RAC、S1.6RAC、S2.0RAC 相较于 S0RAC 分别提高了 5.08%、32.54%、23.39%和 13.90%,S1.2RAC 提升到最大值 3.91 MPa,提高了 32.54%。

而提高再生骨料混凝土的劈裂抗拉的主要原因可能是钢纤维具有较高的抗拉强度，当添加到再生骨料混凝土中时，可以有效增加再生骨料的劈裂抗拉强度。

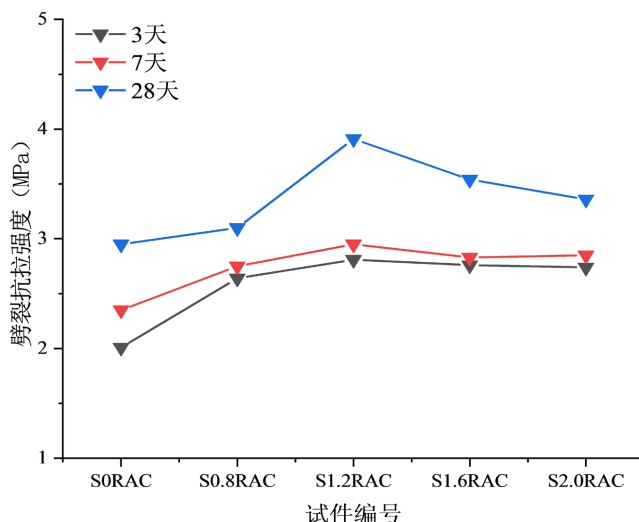


Figure 3. The splitting tensile strength of specimens with different mix ratios

图 3. 各配合比试件的劈裂抗拉强度

3.4. 抗折试验

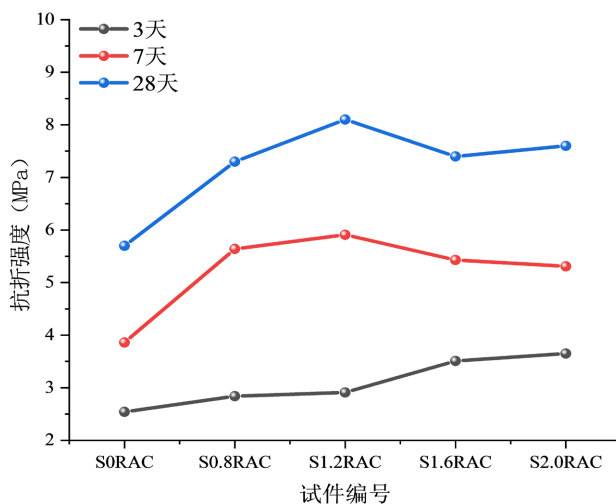


Figure 4. Flexural strength of each mix ratio specimen

图 4. 各配合比试件的抗折强度

为研究钢纤维对再生骨料混凝土的抗折强度的性能研究，各配合比试件的抗折强度如图 4 所示。从图 4 可以看出，对比 3 天、7 天和 28 天龄期时，发现抗折强度均有不同程度的提升，说明随着龄期的增加而抗折强度也随着增加。观察龄期为 3 天时，S0RAC 抗折强度达到 2.54 Mpa。掺入钢纤维后，S0.8RAC、S1.2RAC、S1.6RAC 和 S2.0RAC 相较于 S0RAC，抗折强度分别提高了 12.20%、14.57%、38.19% 和 43.7%，整体趋势呈现增加趋势，说明在 3 天龄期时，随着钢纤维掺入，可明显提高再生混凝土的抗折强度，且最佳钢纤维掺量为 2.0%。原因可能是在早期 3 天龄期时，混凝土还处于较为脆弱的阶段，容易发生裂缝。

而钢纤维可以有效地防止裂缝的扩展,从而提高再生骨料混凝土的早期抗折强度。再次观察 7 天龄期,相较于 3 天龄期,发现抗折强度得到不同程度的提高,其中 S0RAC、S0.8RAC、S1.2RAC、S1.6RAC 和 S2.0RAC 分别提高了 1.32 MPa、2.8 MPa、3 MPa、1.92 MPa 和 1.66 MPa,其中 S1.2RAC 提升抗折强度达到最大值为 5.91 MPa。再次观察 28 天,抗折强度进一步得到了提升,而整体趋势与 7 天龄期趋势基本一致,整体趋势呈现先增加后减少趋势,说明再生骨料混凝土水化基本完成。随着钢纤维掺入,各配合比试件得到不同程度的提升,而掺入达到为 1.2%时,再生骨料混凝土抗折强度达到最大值为 8.1 MPa。再生骨料混凝土抗折强度提升的原因可能是钢纤维具有强大的粘结作用,当钢纤维掺入混凝土中时,它在再生骨料和水泥浆之间形成一种锁链效应,紧密将骨料与水泥浆粘结在一起。在再生骨料混凝土受力时,钢纤维有效地抑制了内部微裂缝的生成,弥补了再生混凝土的强度损失,因而显著提升了抗折强度。这种机制通过加强粘结、防止裂缝扩展,使得再生骨料混凝土在抗折性能方面得到改善[17]。

4. 结论

本文介绍了利用钢纤维掺入再生骨料混凝土的可行性研究。根据不同含量的钢纤维掺入再生骨料混凝土,通过坍落度和各个龄期的抗压试验、劈裂抗拉试验与抗折试验来探究了其工作性能与力学性能。本工作得到的主要结论如下:

1) 适量的掺入钢纤维可以改善再生骨料混凝土的流动性,随着钢纤维的掺入再生骨料混凝土坍落度的逐渐降低,坍落度值在 49~63 mm 之间,当钢纤维掺量达到 1.2%及以上时,对再生骨料混凝土的坍落度的影响不再明显。

2) 适量的钢纤维的掺入可有效提升再生骨料混凝土的抗压强度,特别是在 0.8%含量下,抗压强度达到最大值,提高了 64.52%,且钢纤维的加入提高了再生骨料混凝土的早期抗压强度。

3) 适量的钢纤维的掺入可以提高再生骨料混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度,其中 S1.2RAC 表现出最大提升,达到 32.54%,而抗折强度的最大值为 8.1 MPa,提高了 42.11%。钢纤维的高抗拉强度和粘结作用提高了再生骨料混凝土的劈裂抗拉性能和抗折强度。

参考文献

- [1] 王欢,康玲,牟廷敏,等. 建筑固废材料资源化再生利用的研究现状[J]. 四川水泥, 2023(12): 118-120.
- [2] 陈业超. 再生混凝土的物理力学性能研究[J]. 水利技术监督, 2023(11): 154-156+201.
- [3] 董方园,郑山锁,宋明辰,等. 高性能混凝土研究进展 I: 原材料和配合比设计方法[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 159-166.
- [4] Aloys, D., Amandine, A.N. and Frederic, N. (2021) A Review on Strength Development of High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 307, Article 124865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124865>
- [5] 牟杨,田北平,罗应康. 再生混合骨料混凝土的配合比设计与力学性能研究[J]. 混凝土, 2023(9): 136-140+154.
- [6] 朱和龙,宋春梅,许安邦,等. 石粉含量对人工砂全再生粗骨料混凝土力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2023(4): 97-100.
- [7] 徐美贞,张道明. 辅助胶凝材料对再生混凝土性能影响的研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然版), 2023, 39(6): 77-83+94.
- [8] 陈欣,郑建岚. 矿物掺和料对高性能再生混凝土力学性能的影响[J]. 福州大学学报(自然版), 2016, 44(2): 246-252+258.
- [9] 李文凯. 钢渣对粉煤灰再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(3): 41-44.
- [10] 陈鹏博,李北星,曾波. 再生粗骨料粒径对混凝土力学和耐久性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3679-3687+3694.
- [11] 张恺,林子琪,尹志刚,等. 粗骨料替代率对再生混凝土性能影响研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 230-235.
- [12] 许颖,王帅,樊悦. 废弃卫生陶瓷再生细骨料混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2023(10): 95-100+105.

- [13] 张鹏, 张博, 邓宇, 等. 废砖和废混凝土粗骨料再生混凝土配合比研究[J]. 广西科技大学学报, 2023, 34(2): 30-37.
- [14] 周金枝, 吴学, 钟楚珩, 等. 玄武岩纤维再生混凝土循环加载变形与疲劳寿命预测[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(6): 1-9.
- [15] 姚红利, 郑竣方, 周晚, 等. 对玄武岩纤维废陶瓷再生骨料透水混凝土力学性能和透水性能的探究[J]. 四川建筑, 2023, 43(5): 249-251.
- [16] 吴辉琴, 刘星池, 陈宇良. 碳纤维再生混凝土循环受压性能及本构关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 2743-2753.
- [17] 陈海鹏. 钢纤维碱矿渣再生骨料混凝土的制备及性能研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(9): 16-19.