

混杂纤维再生混凝土力学性能试验研究

周赛男

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月24日

摘要

考虑到再生混凝土存在强度低等固有缺陷, 可考虑采用掺纤维的方式改善其力学强度。为了研究纤维对RAC性能的改善效果, 本文选取低弹性模量的聚丙烯纤维和高弹性模量的钢纤维, 以混掺的方式掺入RAC中, 研究了纤维掺量对RAC立方体抗压、劈裂抗拉、抗折强度和轴心抗压强度的影响。试验结果表明: 混杂掺入钢、聚丙烯纤维均提高RAC的抗压、劈裂抗拉、抗折和轴心抗压强度; 与单掺聚丙烯纤维相比, 混合掺入钢、聚丙烯纤维对RAC的改善效果更佳, 在聚丙烯纤维体积掺量为0.1%和钢纤维体积掺量为1.0%时, 混杂纤维再生混凝土表现出较好的增强效果。

关键词

再生混凝土, 聚丙烯纤维, 钢纤维, 混杂纤维, 力学性能

Experimental Study on Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete with Hybrid Fibers

Sainan Zhou

School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

Considering the inherent defects such as low strength of recycled aggregate concrete (RAC), fiber incorporation can be adopted to modify its mechanical properties. To investigate the improvement effect of fibers on RAC performance, this study selected polypropylene fibers with low elastic modulus and high-elastic-modulus steel fibers, which were mixed into RAC in a hybrid form. The

influence of fiber hybridization on the cubic compressive strength, splitting tensile strength, and flexural and axial compressive strength of RAC was analyzed. The results show that the incorporation of steel fibers and polypropylene fibers can enhance the cubic compressive strength, splitting tensile strength, and flexural and axial compressive strength of RAC. Compared with single polypropylene fiber, the hybrid incorporation of steel fibers and polypropylene fibers yields a better improvement effect on RAC. Within the scope of the test, when the steel fiber volume fraction is 0.1% and the polypropylene fiber volume fraction is 1.0%, the hybrid fibers exhibit a superior reinforcement effect on the performance of RAC.

Keywords

Recycled Aggregate Concrete, Polypropylene Fiber, Steel Fiber, Hybrid Fiber, Mechanical Properties

Copyright © 2026 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

在城镇化生活水平急速提高的时代,建筑物更新换代速度加快,随之而来的是产生大量的建筑垃圾,这将导致了严重的环境污染和资源的极大浪费。目前,我国高度重视资源与环境问题,考虑到建设环境友好型和资源节约型社会,将建筑垃圾资源化这一综合性议题列为重点关注内容。与此同时,学术界也对建筑垃圾资源化合理化展开深入研究,因此国内外众多学者,提出了再生混凝土概念,再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete,以下简称RAC)的研究,RAC是将废弃的混凝土经过破碎、加工、清洗、筛选做成再生骨料,然后部分或者全部代替天然骨料进行拌和而成的混凝土[1]。但由于再生混凝土存在破碎损伤、表面覆盖残留一层水泥基、大量的微裂缝与微孔隙等弊端导致再生混凝土表观密度和堆积密度低,吸水率高。据相关试验结果表明,再生混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量,都随再生骨料的原始混凝土强度的降低而下降,并且随再生骨料用量的增加而降低[2]。因此,探讨如何增强再生混凝土的功能并拓宽其应用范围,已经成为一个颇受关注的研究领域。近来大量实验研究表明,将两种及以上不同的纤维混合后添加到再生混凝土中,可以提高再生混凝土的使用性能,拓展再生混凝土的适用领域,满足当今建筑物结构发展对再生混凝土性能方面的较高要求。

贾文洁等[3]从材料基本性能、材料力学性能2个方面概述了再生混凝土现状。材料基本性能方向来说再生混凝土骨料的表观密度和堆积密度低,吸水率高;材料力学性能方面来说废弃混凝土在破碎的过程中,较大的压力会使得废弃混凝土内部产生大量裂缝。随着再生粗骨料含量的增加,试块的抗压强度、抗拉强度、弹性模量降低。Al-Shamaa等[4]研究结果表明在再生骨料取代率分别为0%,35%,65%,100%下所制成的再生混凝土的立方体抗压强度,劈裂抗拉强度,抗折强度均随着再生骨料取代量的增加而降低。杨润年等[5]人研究试验得出钢纤维的加入显著地提高了混凝土的劈裂和四点弯曲强度,但抗压强度提高不大;而钢纤维再生混凝土得到的抗压、劈裂,四点弯曲强度明显优于钢纤维混凝土。

秦荷成等[6]进行研究和分析钢纤维掺入再生混凝土后对其抗压强度的影响。结果表明:随着钢纤维掺量的增加,再生混凝土立方体抗压强度增大,且钢纤维掺量应在1.0~1.5 kg/m³之间为宜。当骨料替代率在25%~100%时,再生混凝土轴心抗压强度会随着再生骨料替代率的增加而逐渐减小。在再生骨料替代率一定的情况下,掺入一定量的钢纤维会提高再生混凝土的轴心抗压强度。汪振双等[7]研究了再生粗

骨料取代率为 100%，钢纤维含量为 1%、2%、3% 制备的再生混凝土的基本力学性能，其 28 天抗压、抗折强度、劈裂抗拉较普通再生混凝土分别提升了 3.74%~12.75%、6.25%~62.5%、9.52%~45.23%，可总结出钢纤维的掺入对再生混凝土抗压强度的提高不明显，对再生混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度提高比较显著。孔祥清等[8]在钢纤维的体积掺量分别为 0.5%、1.0% 和 1.5%，混杂纤维时聚丙烯纤维的体积掺量固定为 0.6%，钢纤维的体积掺量分别为 0.5%、1.0% 和 1.5% 的情况下研究混杂掺入钢纤维和聚丙烯纤维对再生混凝土力学性能，掺入钢纤维显著提高了抗压性能，但混合掺入聚丙烯纤维后其抗压强度有所降低；单掺钢纤维或混杂掺入钢/聚丙烯纤维均提高劈裂抗拉、抗折和抗冲击性能，但后者改善效果更明显。Afrouhsabet V 等[9]研究人员研究了钢-聚丙烯混杂纤维混凝土，使用具有 60 mm 长度的带钩端部钢纤维以 0.25%、0.50%、0.75% 和 1.0% 的四种不同纤维体积分数和长度为 12 mm 的聚丙烯纤维以 0.15%、0.30% 和 0.45% 的含量。所有纤维增强混凝土均含有 10% 的硅灰作为水泥替代物，硅灰的掺入提高了素混凝土的力学性能和耐久性能。分别掺入钢纤维和聚丙烯纤维对混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均得到提高改善。对于混杂含有 0.85% 钢和 0.15% 聚丙烯纤维的混凝土获得最佳力学性能。霍俊芳等[10]研究了分别掺入钢纤维和聚丙烯纤维对再生混凝土的影响。钢纤维按体积掺量 0.5%、1.5%、2% 掺入再生混凝土中；聚丙烯纤维按 0.2、0.5、0.8 kg/m³ 掺入再生混凝土中。钢纤维和聚丙烯纤维对再生混凝土的力学方面均具有良好的加强效果。对于轴心抗压强度最大时，钢纤维掺量为 1.5%，对于劈裂抗拉强度和抗折强度最大时掺量为 2% 时；而对于再生混凝土的轴心抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度均达到最大，聚丙烯纤维掺量为 0.8 kg/m³。而且纤维的加入明显提升了再生混凝土的劈裂抗拉强度，对轴心抗压强度的提升不明显，对弹性模量的影响较小。

综上所述，为了弥补再生混凝土的缺陷，在再生混凝土中掺入的纤维种类，体积掺量对混凝土力学性能的影响举足轻重，将两种纤维不同类型的纤维掺入再生混凝土中，可以发挥两种纤维各自的优势，对再生混凝土性能的提升更加显著，钢纤维作为在国内外工程建设中应用数量最多，范围最广的纤维类型，钢纤维能改善混凝土内部缺陷，降低混凝土脆性，使其性能得以提高。聚丙烯纤维其价格低廉，性质优良，掺入混凝土中能有效抑制混凝土中裂缝产生与发展，抑制裂缝的宽度与长度，提高混凝土的抗裂性能。

2. 原材料与试验方法

2.1. 试验原材料与配合比

本次试验采用的胶凝材料是郑州某公司所生产的强度等级为 P.O.42.5 的普通硅酸盐水泥；所用的水均为郑州市饮用自来水，其各项指标均能满足试验标准，再生粗骨料是购买于再生资源处理厂 5~20 mm 的连续级配粗骨料碎石，粗骨料物理力学性能检测按照《建设用卵石、碎石》[11] (GB/T 14685-2011) 以及《混凝土用再生粗骨料》[12] (GB/T 25177) 相关规定执行；采用的细骨料是郑州产地的 0~5 mm 的天然河砂，为 II 区中砂；本试验选用束状单丝聚丙烯纤维和端钩型钢纤维，其各项物理性能指标见下表 1；试验设计聚丙烯纤维的体积掺量为 0.1%，钢纤维的体积掺量为 0%、1.0% 和 1.5%，参照《普通混凝土配合比设计规程》[13] 进行基体混凝土配合比设计，配合比见表 2。

Table 1. Fiber parameters

表 1. 纤维参数

纤维类型	长度(mm)	直径(mm)	抗拉强度(MPa)
束状单丝聚丙烯纤维	15	15.5	421
端钩型钢纤维	35	0.7	≥1100

Table 2. Mix proportion design of recycled aggregate concrete
表 2. 再生混凝土配合比设计

试件编号	水胶比	水泥 kg/m ³	砂子 kg/m ³	再生骨料 kg/m ³	水 kg/m ³	减水剂 kg/m ³	PPF kg/m ³	SF kg/m ³
POS0	0.49	398	615	1143	195	2.189	0	0
P0.1S0	0.49	398	615	1143	195	2.189	0.91	0
P0.1S1.0	0.49	398	615	1143	195	2.189	0.91	78
P0.1S1.5	0.49	398	615	1143	195	2.189	0.91	117

注：本试验中再生骨料取代率均为 100%，PXS_Y 表示含义为：P 表示聚丙烯纤维的体积分数为 X%，S 表示钢纤维的体积分数为 Y%。

2.2. 试件制作与养护

混掺纤维再生混凝土试件具体制作步骤如下：按照配合比准备好试验材料；清洗塑料模具，擦净后内壁和底面充分涂刷脱模剂；预湿润搅拌机内壁。搅拌机内倒入再生粗骨料拌制 30 s，再投入水泥与砂的混合物拌制 30 s，随后在搅拌过程中均匀而缓慢地加入纤维，持续搅拌 1 min，最后缓慢加入水与减水剂的混合物拌制 2 min，接着将搅拌好的再生混凝土装入准备好的模具中；将装满的模具搬到振动台上，开始振动到表面出现水泥浆且无气泡产生，并用抹刀铲平表面。将浇筑成型的再生混凝土试件搬至实验厅空地，再用保鲜膜覆盖表面后静置 24 h，可进行脱模操作，编号记录后放置在温度约为 20℃、相对湿度 95% 以上的标准养护条件下进行养护，龄期达到 28 天后可进行相关测试。

2.3. 试验方法

所有试件的尺寸和形状参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》[14] 的有关规定执行。采取尺寸 100 mm × 100 mm × 100 mm 试件进行 RAC 立方体抗压强度和劈裂抗压强度试验，采用尺寸 100 mm × 100 mm × 400 mm 试件进行 RAC 抗折实验，采用尺寸 100 mm × 100 mm × 300 mm 试件进行 RAC 轴心抗压实验。

3. 试验结果与分析

试验测得混杂纤维的立方体抗压强度、劈裂抗压强度试验、抗折强度实验和轴心抗压强度试验结果如表 3 所示。

Table 3. Test results (MPa)
表 3. 试验结果(MPa)

试件编号	抗压强度	劈裂抗拉强度	抗折强度	轴心抗压强度
POS0	37.1	2.1	4.7	21.5
P0.1S0	39.6	2.3	5.4	24.2
P0.1S1.0	44.3	4.5	8.8	35.4
P0.1S1.5	41.8	3.6	5.7	34.9

3.1. 立方体抗压强度

图 1 为试块抗压破坏形态，POS0 组和 P0.1S0 组试件接近极限荷载时，由小裂纹向大裂纹发展，混凝土部分剥落且破坏发生前未出现明显预兆，呈现脆性破坏状态。而 P0.1S1.0 组和 P0.1S1.5 组试件表面出现较多裂缝，呈现多条裂纹的特征，裂缝存在但未导致试件破坏，外观变形较小且整体性好于 POS0 组和 P0.1S0 组试件。

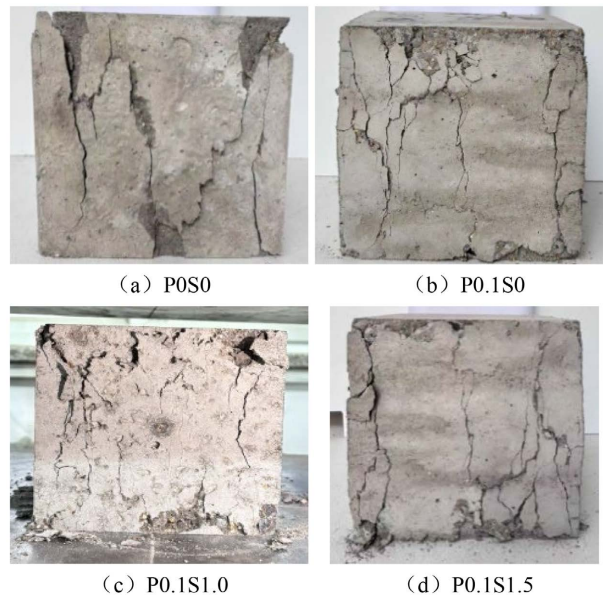


Figure 1. Failure mode of a cube compressive test block
图 1. 立方体试块抗压破坏形态

将表 3 的 RAC 试验结果与钢纤维体积掺量的关系绘制成柱状图如图 2 所示, 由图 2 可以看出, 再生混凝土抗压强度随着钢纤维体积掺量的增加先上升后降低, 但掺纤维的试件抗压强度均大于素 RAC 试件, 当钢纤维体积掺量为 1.0%, 抗压强度最大, 达到 44.3 MPa, 较不掺钢纤维的 P0.1S0 试件提高了 11.9% 的强度, 较素 RAC 试件提高了 19.4% 的强度。可得出聚丙烯纤维体积掺量为 0.1% 和钢纤维体积掺量为 1.0% 是抗压强度最大。

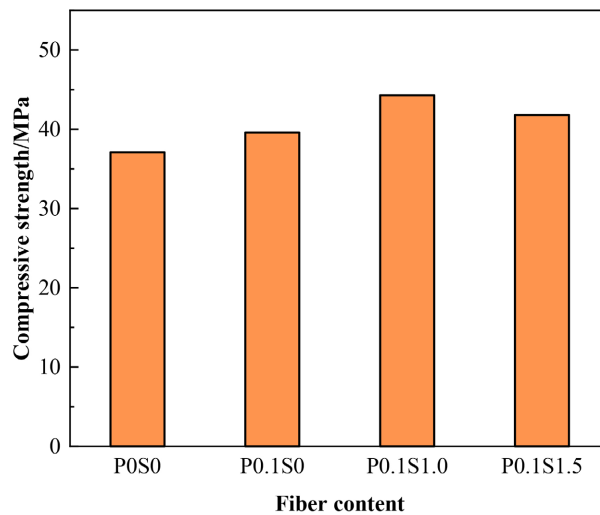


Figure 2. The effect of basalt fiber content on compressive strength
图 2. 不同纤维掺量对抗压强度的影响

3.2. 劈裂抗拉强度

图 3 为试块劈裂抗拉破坏形态, 与上一节立方体抗压趋势一致, P0S0 组和 P0.1S0 组试件接近极限荷载时, 沿着劈裂线被分成两部分, 破坏发生前未出现明显预兆, 呈现脆性破坏状态。而 P0.1S1.0 组和

P0.1S1.5 组试件在加载过程中，能听到钢纤维拉拔的撕拉声，在达到极限荷载时没有导致试件直接劈裂成两半破坏。

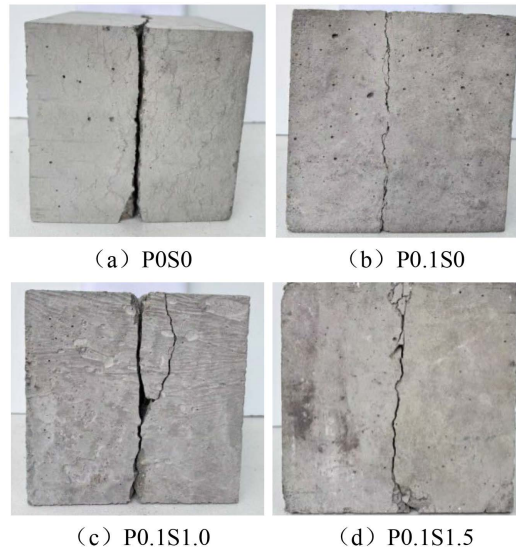


Figure 3. Failure mode of cubic split tensile test block
图 3. 立方体劈裂抗拉试块破坏形态

将表 3 的 RAC 试验结果与钢纤维体积掺量的关系绘制成柱状图如图 4 所示，由图 4 可以看出，再生混凝土劈裂抗拉强度随着钢纤维体积掺量的增加先上升后降低，但掺纤维的试件劈裂抗拉强度均大于素 RAC 试件，当钢纤维体积掺量为 1.0%，劈裂抗拉强度最大，达到 4.5 MPa，较不掺钢纤维的 P0.1S0 试件提高了 95.7% 的强度，较素 RAC 试件提高了 114.3% 的强度，但单掺聚丙烯纤维的 P0.1S0 试件与素 RAC 试件相比，提高幅度不大。可得出聚丙烯纤维体积掺量为 0.1% 和钢纤维体积掺量为 1.0% 是劈裂抗拉强度最大。

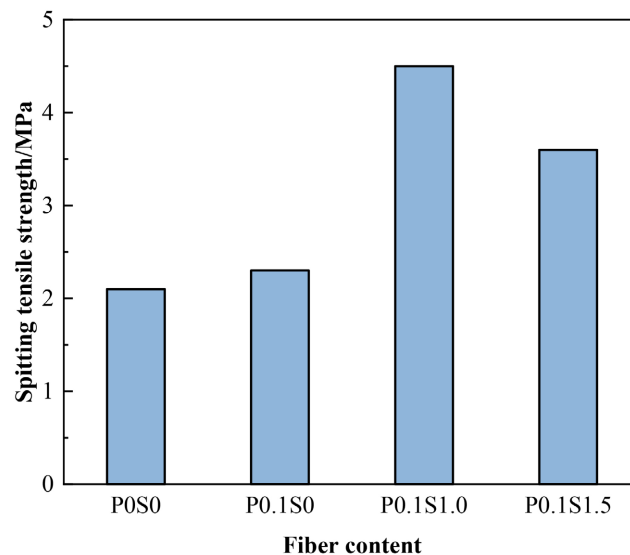


Figure 4. The effect of basalt fiber content on splitting tensile strength
图 4. 不同纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

3.3. 抗折强度

图5为试块抗折破坏形态,对于 P0S0 和 P0.1S0 组试件,随着外部荷载继续达到极限承受荷载 70%~80% 左右,在试件两跨中间的跨中位置其低部会首先出现裂缝,随着荷载加剧,裂缝迅速变宽同时向上延伸,最终导致试样被分割为两个独立部分,该失效形式属于典型的突发性脆性破坏。

对于 P0.1S1.0 和 P0.1S1.5 组试件添加一定量的钢纤维后,试件出现延而不坏的特征,当荷载达到极限荷载能力 80% 以上,此时能听到有钢纤维被拉拔发出“吡吡”的声音,跨中底部也出现水泥砂浆碎渣的脱落,试件最终受弯破坏。

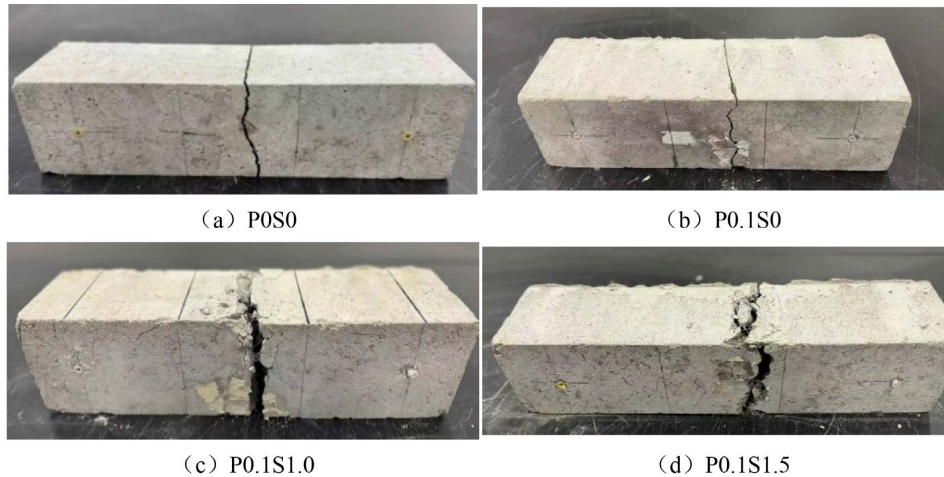


Figure 5. Failure modes of concrete flexural specimens
图 5. 抗折试块破坏形态

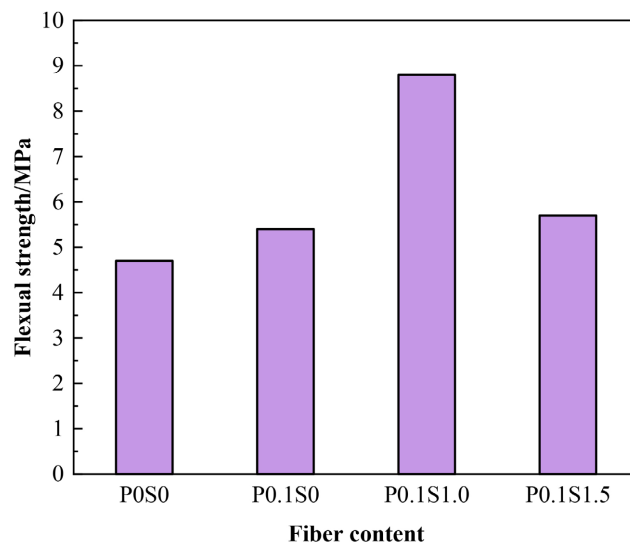


Figure 6. The effect of basalt fiber content on compressive strength
图 6. 不同纤维掺量对抗折强度的影响

将表 3 的 RAC 试验结果与钢纤维体积掺量的关系绘制成柱状图如图 6 所示,由图 6 可以看出,再生混凝土抗折强度随着钢纤维体积掺量的增加先上升后降低,但掺纤维的试件抗折强度均大于素 RAC 试件,当钢纤维体积掺量为 1.0%,抗折强度最大,达到 8.8 MPa,较不掺钢纤维的 P0.1S0 试件提高了 63.0%

的强度，较素 RAC 试件提高了 87.2% 的强度，但单掺聚丙烯纤维的 P0.1S0 试件与素 RAC 试件相比，提高幅度不大。可得出聚丙烯纤维体积掺量为 0.1% 和钢纤维体积掺量为 1.0% 是抗折强度最大。

3.4. 轴心抗压强度

图 7 为试块轴心抗压破坏形态。对于 POS0 和 P0.1S0 组试件，达到峰值荷载后，裂纹扩展速度加快，结构随即进入快速失效阶段。对于 P0.1S1.0 和 P0.1S1.5 组试件，添加一定体积掺量的钢纤维后，在最后破坏阶段，斜裂缝开始出现并迅速变宽发展，进而贯通整个截面形成主斜裂缝，其倾角角度大约在 54° ~ 72° 之间；随着裂缝宽度不断增加，钢纤维不断被拔出脱粘，能发挥的优势作用也被逐渐削弱，但试块仍保留残余承载能力，整体呈现开裂但未完全解体的受力状态。

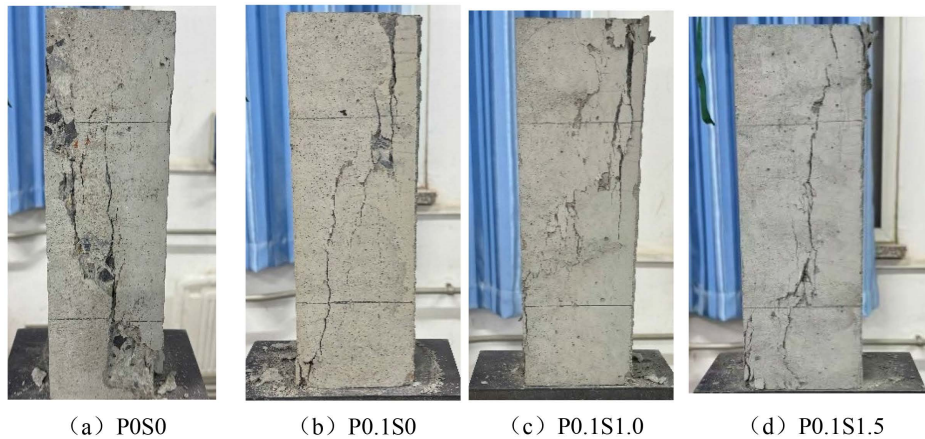


Figure 7. Failure modes of axial compression specimens

图 7. 轴心抗压试块破坏形态

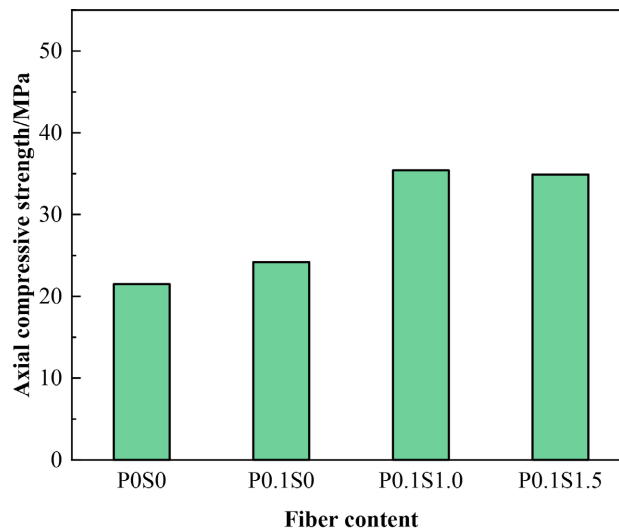


Figure 8. The effect of basalt fiber content on axial compressive strength

图 8. 不同纤维掺量对轴心抗压强度的影响

将表 3 的 RAC 试验结果与钢纤维体积掺量的关系绘制成柱状图如图 8 所示，由图 8 可以看出，再生混凝土轴心抗压强度随着钢纤维体积掺量的增加先上升后降低，但掺纤维的试件抗压强度均大于素 RAC 试件，当钢纤维体积掺量为 1.0%，抗压强度最大，达到 35.4 MPa，较不掺钢纤维的 P0.1S0 试件提高了

46.3%的强度,较素 RAC 试件提高了 64.7%的强度,但单掺聚丙烯纤维的 P0.1S0 试件与素 RAC 试件相比,提高幅度不大。可得出聚丙烯纤维体积掺量为 0.1%和钢纤维体积掺量为 1.0%是轴心抗压强度最大。

4. 结论

通过对掺有不同体积产量的钢纤维和聚丙烯纤维再生混凝土试件进行立方体抗压试验、劈裂抗压试验、抗折实验和轴心抗压试验,得出以下结论:

(1) 再生混凝土内掺入纤维后,各项力学性能得到一定程度的提高,在聚丙烯纤维体积掺量为 0.1%和钢纤维体积掺量为 1.0%,混杂纤维再生混凝土表现出较好的增强效果,其中立方体抗压较素再生混凝土提高 19.4%,劈裂抗拉强度提高 114.3%,抗折强度提高 87.2%,轴心抗压强度提高 64.7%。

(2) 单掺聚丙烯纤维的性能较素再生混凝土的各项性能提高幅度不大,钢纤维对再生混凝土的提高幅度优于聚丙烯纤维。

(3) 过量的体积掺量会对混杂纤维再生混凝土试件的力学性能有降低作用,其立方体抗压强度、劈裂抗压强度、抗折强度和轴心抗压强度均低于适量体积掺量的再生混凝土试件。

参考文献

- [1] 张世民,王社良,张博,等.再生混凝土力学性能规律试验研究[J].混凝土,2017(10):100-103.
- [2] 孙岩,孙可伟,郭远臣.再生混凝土的利用现状及性能研究[J].混凝土,2010(3):105-107.
- [3] 贾文洁,张士萍,方钊.再生混凝土的材料特性及其结构性能综述[J].南阳理工学报,2023,15(6):73-77+117.
- [4] Al-Shamaa, M.F.K., Ali, A.A. and Ahmed Al-Mulla, I.F. (2024) Mechanical Characteristics of Structural Concrete Using Building Rubbles as Recycled Coarse Aggregate. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, **33**, Article 20240001. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2024-0001>
- [5] 杨润年,尹久仁,肖华明,等.钢纤维再生混凝土力学性能的试验研究[J].混凝土,2006(1):27-29+42.
- [6] 秦荷成,赵治超,叶水斌,等.钢纤维对再生混凝土抗压强度影响的试验研究[J].混凝土,2023(6):120-124.
- [7] 汪振双,谭晓倩.钢纤维再生粗集料混凝土的力学性能和抗冻性研究[J].硅酸盐通报,2016,35(4):1184-1187.
- [8] 孔祥清,何文昌,周聪,等.混杂掺入钢/聚丙烯纤维再生混凝土力学性能及抗冲击性能试验研究[J].建筑科学,2020,36(3):94-99.
- [9] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. (2015) Mechanical and Durability Properties of High-Strength Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, **94**, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>
- [10] 霍俊芳,白笑笑,姜鹏飞,等.钢纤维和聚丙烯纤维再生混凝土力学性能研究[J].混凝土,2019(8):92-95+99.
- [11] 中国砂石协会.GB/T 14685-2011 建筑用卵石、碎石[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [12] 中国建筑科学研究院.GB/T 25177 混凝土用再生粗骨料[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [14] 中华人民共和国建设部.GB/T50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.