

# 钢 - 聚丙烯混杂纤维混凝土力学性能研究

李文娅, 申淼江, 李子昊, 许兴哲, 杨泽昊, 叶鹏, 贾艳敏\*

东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月10日; 发布日期: 2024年4月22日

## 摘要

为研究混杂钢-聚丙烯纤维对C60混凝土的力学特性和微观结构性能的影响, 通过对掺入不同掺量和不同形状的纤维的试件进行力学试验, 测得各组试件在不同阶段的抗压强度和抗折强度。钢纤维掺量分别为0%、0.5%、0.75%、1%、1.5%、0.25%, 聚丙烯纤维掺量为0%、0.15%、0.25%, 钢纤维种类有剪切型、铣削型、端勾型。结果表明随机分布的纤维可以发挥次筋作用, 降低混凝土砂浆的流动性。掺入0.5%钢纤维和0.15%聚丙烯纤维的混凝土可以提高混凝土的抗压强度和抗折强度。粉煤灰取代率为20%时会降低混杂纤维混凝土的力学性能。剪切型钢纤维的掺入会使抗折强度下降, 铣削、端勾型钢纤维可以同时提高混凝土的抗压强度和抗折强度, 有利于提高混凝土延展性并且减少开裂。

## 关键词

钢纤维, 聚丙烯纤维, 抗压强度, 抗拉强度, 混掺纤维混凝土

# Study on Mechanical Properties of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete

Wenya Li, Miaojiang Shen, Zihao Li, Xingzhe Xu, Zehao Yang, Peng Ye, Yanmin Jia\*

School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 10<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2024

## Abstract

In order to study the effect of blended steel-polypropylene fibers on the mechanical properties and microstructural properties of C60 concrete, the compressive and flexural strengths of each

\*通讯作者。

文章引用: 李文娅, 申淼江, 李子昊, 许兴哲, 杨泽昊, 叶鹏, 贾艳敏. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 410-415. DOI: 10.12677/hjce.2024.134046

group of specimens at different stages were measured by conducting mechanical tests on specimens with different admixtures and different shapes of fibers. The dosage of steel fibers was 0%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5%, and 0.25%, and the dosage of polypropylene fibers was 0%, 0.15%, and 0.25%, and the types of steel fibers were shear, milled, and end-hooked. The results show that the randomly distributed fibers can play the role of sub-reinforcement and reduce the fluidity of concrete mortar. Concrete with 0.5% steel fibers and 0.15% polypropylene fibers can increase the compressive strength and flexural strength of concrete. Fly ash substitution rate of 20% decreases the mechanical properties of mixed fiber concrete. The inclusion of shear type steel fibers will reduce the flexural strength, milling, and end-hooked type steel fibers can simultaneously increase the compressive strength and flexural strength of concrete, which is conducive to improving the ductility of concrete and reducing cracking.

## Keywords

Steel Fibre, Polypropylene Fiber, Compressive Strength, Tensile Strength, Hybrid Fiber Reinforced Concrete

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. 绪论

混凝土是一种常见的建筑材料，近年来，随着大跨度桥梁桥面板的发展，高性能混凝土的应用越来越广泛。因此，关于高性能纤维混凝土材料的研究成为现代科学发展的一个焦点。赵士坤(2019)通过试验研究了钢纤维和纳米 SiO<sub>2</sub> 对混凝土抗压强度、抗折强度和劈裂抗拉强度的影响，并揭示了相应的影响规律[1]。郭光玲(2020)的研究则认为，钢纤维混凝土试块的整体强度性能明显优于单一的混凝土试件，说明了钢纤维能够有效增强混凝土性能，提高混凝土韧性，防止裂缝出现[2]。Guo H.等(2021)采用弯曲、准静态和动态劈裂拉伸试验，研究了钢与聚丙烯纤维混杂组合对高强混凝土的增韧效果。认为当高强混凝土中同时使用适量的钢纤维和聚丙烯纤维时，其弯曲强度和准静态劈裂抗拉强度增大。通过分析韧性比、韧性指数和耗能情况，发现钢纤维的引入可以大幅提高高强混凝土的韧性，但仅受聚丙烯纤维的影响较小。Zhu Yuan 研究得到不同聚丙烯纤维的表面疏水性的差异，可能会对聚丙烯纤维混凝土的性能和聚丙烯纤维的最佳含量产生显著影响[3]。Hao Wu 研究得到纤维掺入对低水胶比(w/b = 0.27)、高矿物掺合料掺量砂浆样品有明显的负面影响[4]。吴昊[5]研究得到矿物掺合料对砂浆的强度特性都有显著影响。掺入不适宜比例的矿物掺合料，会造成矿物掺合料的“负混掺效应”抵消掺入纤维的正增强效应，造成砂浆抗压强度的降低。基于上述发现，针对钢纤维和聚丙烯纤维混凝土性能的研究不断取得新的成就，但仍需对其本质进行深入研究。

因此，本研究初步分析了混杂纤维掺量对混凝土力学性能影响的机理，但其机理还需进一步深入研究。通过引入钢和聚丙烯纤维的最佳混杂组合，改变钢纤维形状以及胶凝材料组分，进一步提高高强混凝土的韧性。本试验针对掺入混杂钢-聚丙烯纤维的 C60 高性能混凝土的制备及工程性能进行系统研究。

## 2. 试验部分

### 2.1. 试验材料及内容

原材料：水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，硅灰为高强混凝土用白色高纯硅灰，粗骨料为 5~30 mm

的级配碎石, 细骨料为优质河砂, 减水剂为萘系高效减水剂, 减水率不低于 20%, 减水剂掺量通过适配确定, 水胶比为 0.34。钢纤维为剪切型、端勾型、铣削型钢纤维, 长度 30 mm, 抗拉强度>500 MPa。聚丙烯纤维长度为 12 mm。

试验内容: (1) 不同掺量的钢纤维和聚丙烯纤维 C60 强度等级高性能混凝土的制备工艺和力学性能。(2) 不同形状的钢纤维和聚丙烯纤维 C60 强度等级高性能混凝土的制备工艺和力学性能。

## 2.2. 试件制备

首先在搅拌机中加入碎石、砂和水泥, 搅拌 2 min, 充分混合。在搅拌机中再加入硅灰、粉煤灰后, 再进行搅拌, 在搅拌过程中缓慢均匀加入钢纤维、聚丙烯纤维、减水剂和水, 充分混合均匀。将搅拌结束获得的混凝土砂浆倒入模具中, 在振捣台上充分振实。用抹灰刀抹平试件多余浆料, 用保鲜膜封口, 在室温下放置 24 小时。脱模, 放入养生室标准养护 28 天。

## 2.3. 试验一

### 2.3.1. 试验一配合比设计

混凝土设计强度等级: C60。配合比设计参考规范 JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》和规范 JG/T 472-2015《钢纤维混凝土》进行。配合比见表 1。

Table 1. Mix proportion

表 1. 配合比

编号	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	硅灰 (kg/m <sup>3</sup> )	细骨料 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨料 (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	减水剂 (kg/m <sup>3</sup> )	钢纤维 %	聚丙烯纤维 %
PC-0	475	25	622.8	1107.2	170	5	0	0
S0.25-P0.15	475	25	622.8	1107.2	170	5.25	0.25	0.15
S0.5-P0.15	475	25	622.8	1107.2	170	5.5	0.5	0.15
S0.75-P0.25	475	25	622.8	1107.2	170	5.75	0.75	0.25
S1-P0.25	475	25	622.8	1107.2	170	6	1	0.25
S1.5-P0.25	475	25	622.8	1107.2	170	6.25	1.5	0.25

### 2.3.2. 坍落度测试

对每次充分搅拌结束后获得的混凝土进行坍落度试验。不同组砂浆坍落度数据如图 1 所示。多组试验坍落度处于 80~100 mm 范围内, 砂浆流动性较强, 钢纤维、聚丙烯纤维含量越多, 使得纤维比表面积更大, 需要更多的水泥进行包裹, 流动性随之降低。

### 2.3.3. 力学试验

不同掺量的钢纤维和聚丙烯纤维混凝土, 在不同养护时间下的抗压强度试验结果见图 2(a), 抗折强度试验结果见图 2(b)。

由图 2(a)可见, 随着养护时间的增加混凝土的抗压强度也随之增加。在 7 天的养护时间下, 各类混凝土的抗压强度相差不大, 养护时间达到 14 天后, PC 混凝土的抗压强度明显高于其他种类。在 28 天养护结束后, S0.5, P0.15 混凝土的抗压强度和抗折强度高于其他种类混凝土。

由图 2(b)可见, 随着养护时间的增加混凝土的抗折强度也随之增加。在 7 天的养护时间下, 各类混

混凝土的抗压强度相差不大。养护时间达到 14 天直至 28 天养护期结束, S0.5, P0.15 混凝土中, 混杂纤维均匀分布在基体中, 通过与胶凝基体的粘结, 在试块被施加荷载后能够阻止界面过渡区或薄弱区内部的微裂缝扩展, 从而起到增强作用, 使得抗压强度和抗折强度高于其他组。

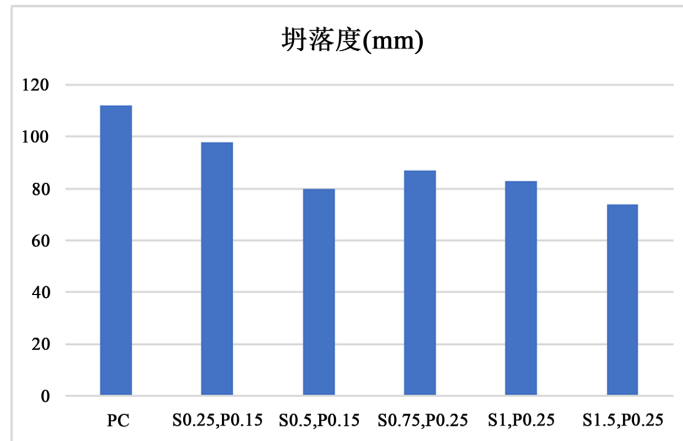
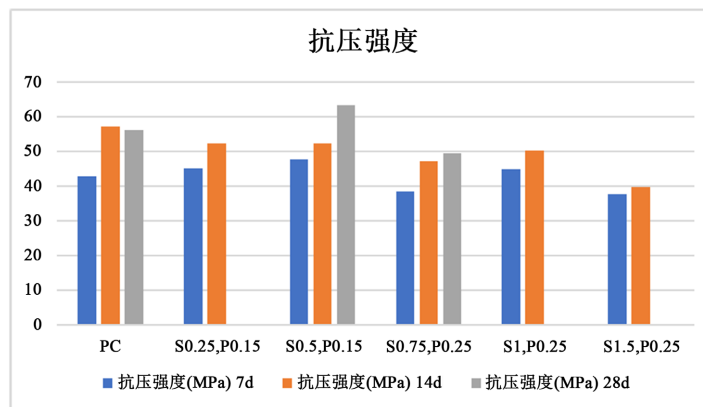
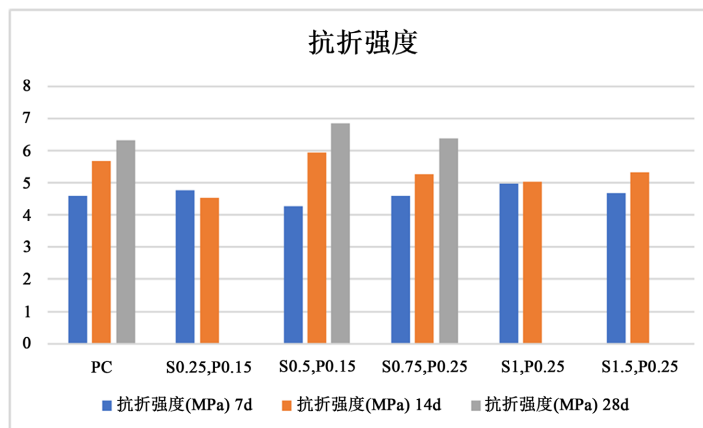


Figure 1. Slump of concrete mortar

图 1. 混凝土砂浆坍落度



(a)



(b)

Figure 2. Test results for compressive strength and flexural strength

图 2. 抗压强度和抗折强度试验结果

聚丙烯纤维加入后形成的三向网络可抑制混凝土集料的沉降,从而降低界面过渡区的水灰比[6],使得混凝土力学性能得到小幅度的改善。但掺量较大时,纤维分散均匀程度降低导致缺陷增加,危害空隙增加,力学性能也随之变差。

## 2.4. 试验二

### 2.4.1. 试验二配合比设计

混凝土设计强度等级: C60。配合比设计参考规范 JGJ 55-2011《普通混凝土配合比设计规程》和规范 JG/T 472-2015《钢纤维混凝土》进行。配合比见表 2。

Table 2. Mix proportion

表 2. 配合比

编号	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰 (kg/m <sup>3</sup> )	硅灰 (kg/m <sup>3</sup> )	砂 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨料 (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	钢纤维 %	钢纤维 类型	聚丙烯 纤维%
F20-0	375	100	25	622.8	1107.2	170	0		0
F20-MS0.5-PP0.15	375	100	25	622.8	1107.2	170	0.5	剪切	0.15
F20-SS0.5-PP0.15	375	100	25	622.8	1107.2	170	0.5	铣削	0.15
F20-HS0.5-PP0.15	375	100	25	622.8	1107.2	170	0.5	端勾	0.15
F0-0	475	0	25	622.8	1107.2	170	0		0
F0-MS0.5-PP0.15	475	0	25	622.8	1107.2	170	0.5	剪切	0.15
F0-SS0.5-PP0.15	475	0	25	622.8	1107.2	170	0.5	铣削	0.15
F0-HS0.5-PP0.15	475	0	25	622.8	1107.2	170	0.5	端勾	0.15

### 2.4.2. 力学性能测试及结论

试验结果如表 3 所示。

Table 3. Mechanical test results

表 3. 力学试验测试结果

编号	28 d 抗压强度(MPa)	相比 0 掺量纤维增幅	28 d 抗折强度(MPa)	相比 0 掺量纤维增幅
F20-0	41.4	0%	7.41	0%
F20-MS0.5-PP0.15	72	73.9%	7.26	-2%
F20-SS0.5-PP0.15	50.5	22%	7.86	6.1%
F20-HS0.5-PP0.15	65.1	57.2%	7.54	1.8%
F0-0	46.5	0%	7.14	0%
F0-MS0.5-PP0.15	52.2	12.3%	6.58	-7.8%
F0-SS0.5-PP0.15	53.8	15.7%	7.51	5.2%
F0-HS0.5-PP0.15	73.3	57.6%	7.77	8.8%

不同形状的钢纤维和聚丙烯纤维 C60 强度等级高性能混凝土,如表 3 可见,纤维混凝土的抗压强度

较 0 掺量纤维有明显增加, 其中 F20-MS0.5PP0.15 类型混凝土抗压强度增长最为明显, F20-HS0.5PP0.15 和 F0-HS0.5PP0.15 的抗压强度也有明显增加。与 0 掺量纤维混凝土相比, 由于钢纤维具有良好的延展性, 钢纤维和聚丙烯纤维的掺入, 增加了混凝土材料的韧性, 增加了混凝土的抗压强度。在钢纤维和聚丙烯纤维掺量相同的情况下, 粉煤灰和硅灰的合理掺用大大提高了混凝土的强度, 改善混凝土的耐久性, 使混凝土抗压强度出现明显的增长。

铣削、端勾种类钢纤维混凝土抗压强度增幅较为稳定。相较于抗压强度, 掺入纤维混凝土的抗折强度变化较小, F20-0 和 F0-0 无纤维掺入抗折强度无变化, F20-MS0.5PP0.15 和 F0-MS0.5PP0.15 使用剪切型钢纤维使混凝土抗折强度出现小幅度下降, 铣削、端勾种类钢纤维混凝土抗折强度均有小幅度增加。

### 3. 结论

1) 掺入一定掺量范围的混杂钢纤维和聚丙烯纤维会降低混凝土砂浆的流动性及吸水率, 当钢纤维掺量 0.5% 聚丙烯纤维掺量为 0.15% 时, 高强度混凝土的抗压强度和抗折强度能得到明显提高。

2) 对于 F20-MS0.5PP0.15 和 F0-MS0.5PP0.15, 由于水胶比低 ( $w/b = 0.34$ ), 粉煤灰取代水泥的比例大以及纤维掺入量大, 导致混凝土工作性能差, 成型困难, 基体中出现大量孔隙, 导致剪切型钢纤维的掺入降低了抗折强度, 不利于混凝土的长期使用。

3) 铣削、端勾种类钢纤维可以同时提高混凝土的抗压强度和抗折强度。钢纤维和聚丙烯纤维形成了一个三维交错的支撑网络, 胶凝基质中的裂纹只有通过绕过纤维、断裂纤维或拔出纤维才能继续发展, 从而限制了胶凝基质中裂纹尖端的扩展, 有利于提高混凝土延展性并且减少开裂, 提高混凝土工程性能。强度的提高可以减小桥面板的截面尺寸, 减轻桥梁自重, 实现大跨径桥梁的发展。

### 基金项目

校级大学生创新训练计划项目(编号 202310225636)。

### 参考文献

- [1] 张秀芝, 董青, 刘辉, 等. 钢纤维-聚丙烯纤维混杂混凝土耐高温性能研究[J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(4): 101-105.
- [2] Guo, H., Jiang, L., Tao, J., *et al.* (2021) Influence of a Hybrid Combination of Steel and Polypropylene Fibers on Concrete Toughness. *Construction and Building Materials*, **275**, Article ID: 122132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122132>
- [3] Yuan, Z. and Jia, Y. (2021) Mechanical Properties and Microstructure of Glass Fiber and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: An Experimental Study. *Construction and Building Materials*, **266**, Article ID: 121048. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048>
- [4] Wu, H., Jia, Y., Yuan, Z., *et al.* (2022) Study on the Mechanical Properties, Wear Resistance and Microstructure of Hybrid Fiber-Reinforced Mortar Containing High Volume of Industrial Solid Waste Mineral Admixture. *Materials*, **15**, Article 3964. <https://doi.org/10.3390/ma15113964>
- [5] 吴昊, 张佳豪, 吴松翰, 等. 混杂纤维与矿物掺合料共同作用对砂浆力学性能的影响[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 535-541.
- [6] 吕志恒, 程铭, 蒋喜生, 等. 玻璃纤维和聚丙烯纤维改善混凝土微观结构研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 267-270.