

[文章编号] 1003—4684(2021)02-0076-05

钢纤维再生混凝土强度与破坏形态试验研究

周陈旭, 谭 燕, 周金枝, 何 奇

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 再生混凝土是一种绿色混凝土,但是力学性能不如普通素混凝土(C),往再生混凝土(RC)中掺入钢纤维制成钢纤维再生混凝土是一种改性再生混凝土,可以提高 RC 的力学性能。本试验制备了 36 个 150 mm×150 mm×150 mm 的钢纤维再生混凝土(SFRC)标准试样用于抗压强度和劈裂抗拉强度试验,同时还制备了 72 个 150 mm×150 mm×550 mm 的小梁试样用于四点弯曲试验,研究钢纤维掺量对再生混凝土力学性能,并通过试验观察分析了各配合比试样的破坏形态。实验结果表明,随着钢纤维掺量的增加,再生混凝土的强度均呈先增加后降低的趋势,当钢纤维掺量为 1.0%时,再生混凝土强度提高最大。同时钢纤维的掺入也增强了再生混凝土的韧性,并降低离散性。

[关键词] 钢纤维; 再生混凝土; 强度; 破坏; 疲劳寿命

[中图分类号] TU528.572 **[文献标识码]** A

混凝土建筑建造时消耗大量自然资源,拆除时也会产生难以回收的建筑垃圾,对生态环境造成了难以挽回的破坏^[1]。近十几年以来,随着我国经济向好,城市飞速发展,大量未达到使用年限的建筑被拆除,造成建筑垃圾难以处理,资源浪费,环境污染等问题^[2]。如何对建筑垃圾再利用引起了学者的广泛关注。将建筑废料进行破碎、清洗、筛分等步骤之后称之再生粗骨料^[3]。肖建庄^[4]等研究了再生混凝土碳排放,再生混凝土有更好的环保价值,随着再生骨料替代率的增加,碳排放随之减少。乔宏霞^[5]等调查表明荷兰、韩国、美国等发达国家,再生混凝土起步较早,技术相比于中国更加成熟,利用率大幅领先于中国。再生混凝土不仅环保,是一种绿色混凝土,在经济上也具有较大优势^[6]。

再生混凝土因使用建筑废料,其力学性能、耐久性和结构性能上都明显不如天然骨料混凝土,在实际工程中应用还存在一定不足^[7]。通过对再生混凝土进行改性可以改善再生混凝土的各种性能^[8]。其中纤维可以改善其抗拉强度差,脆性大的缺点,纤维通常有橡胶纤维^[9]、钢纤维^[10]、聚丙烯纤维^[11]等。白敏^[12]等通过观察混凝土微观结构并结合实验发现,混凝土内部有较多有害孔隙结构,而钢纤维具有随机性,可以弥补这些孔隙,使混凝土密实度更高,

有更出色的力学性能。薛国杰^[13]等研究 6 种不同形状的钢纤维对混凝土的力学性能的影响。Senaratne^[14]同时使用再生骨料和钢纤维,不仅增强了再生混凝土强度,使其可以替代普通混凝土,同时对于普通混凝土还具有一定的成本优势,平衡了成本及力学性能。

目前国内外对钢纤维混凝土和再生混凝土研究较多,但是较少研究钢纤维掺量对再生混凝土力学性能及破坏形态的影响。本文使用掺入不同体积钢纤维的再生混凝土,对比素混凝土和再生混凝土的抗压、劈拉、四点弯强度,同时分析其破坏形态,为钢纤维再生混凝土的应用提供理论基础。

1 试件设计

1.1 原材料

水泥采用湖北某公司生产的 42.5 级的水泥,标准稠度用水量为 26.6%;粗骨料粒径为 5~31.5 mm,其中天然骨料为天然碎石,表观密度 2648 kg/m³,再生骨料为破碎的 C30 强度的混凝土,表观密度 2520 kg/m³;细骨料粒径<5 mm,为Ⅱ区中砂;钢纤维为剪切波浪型钢纤维,长 35 mm,宽 2 mm,厚 0.8 mm,抗拉强度 538 MPa,钢纤维密度为 7850 kg/m³;粉煤灰为 I 级粉煤灰,细度 325

[收稿日期] 2020—09—07

[基金项目] 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHSL19—04—KF);湖北省大学生创新创业项目(S202010500053)

[第一作者] 周陈旭(1996—),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为力学

[通信作者] 谭 燕(1981—),女,湖南娄底人,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为轨道交通振动及减振隔振措施

目,密度 2.4 g/cm³,含水量 0.5%,烧失量为 3.6%;矿粉是中建某厂生产的 S95 级矿粉,密度 2.9 g/cm³,比表面积 435 m²/kg。外加剂为中建某厂生产的聚羧酸减水剂,减水率为 24%~26%,含气量 4.6%。

1.2 试件配合比设计

根据《普通混凝土配合比设计规程》^[15](JCJ 55—2011)设计方法,本试验采用的基准 C30 混凝土配合比为某工程实际所用的配合比,将天然粗骨料部分等质量替换为再生粗骨料,替换率取为 20%。C 为 C30 强度的天然骨料混凝土,RC 为再生骨料

替换天然骨料,替换率为 20% 的再生混凝土,SF0.5RC、SF1.0RC、SF1.5RC 和 SF2.0RC 分别为在 RC 中掺入 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 的钢纤维再生混凝土。根据《普通混凝土力学性能试验法标准》^[17](GB 50081—2002)和《纤维混凝土试验方法标准》^[16](CECS 13—2009),本试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试样进行抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验,采用 150 mm×150 mm×550 mm 标准小梁试件进行四点弯曲试验,采用三个相同配合比试件的算术平均值作为最终结果。试件配合比见表 1。

表 1 试样配合比								kg/m ³	
试样编号	水	水泥	天然粗骨料	再生粗骨料	细骨料	掺合料		外加剂	钢纤维
						粉煤灰	矿粉		
C	159.5	209.7	1029.2	0	834.0	60.1	100.2	12.58	0
RC	159.5	209.7	823.4	205.8	834.0	60.1	100.2	15.91	0
SF0.5RC	159.5	209.7	823.4	205.8	834.0	60.1	100.2	15.91	39.3
SF1.0RC	159.5	209.7	823.4	205.8	834.0	60.1	100.2	15.91	78.5
SF1.5RC	159.5	209.7	823.4	205.8	834.0	60.1	100.2	15.91	117.8
SF2.0RC	159.5	209.7	823.4	205.8	834.0	60.1	100.2	15.91	157

2 试验结果分析

2.1 抗压试验结果与分析

2.1.1 抗压强度分析 从图 1 可以看出,素混凝土 C 抗压强度为 42.21 MPa,替换 20% 的再生骨料后,RC 抗压强度明显降低。由图 2 可知,RC 抗压强度仅为 C 的 77.6%,RC 中再掺入钢纤维,当钢纤维掺量低于 1.0% 时,随着钢纤维掺量的增加,SFRC 抗压强度逐渐提高,钢纤维掺量为 1.0% 时强度达到最高值 41.32 MPa,它是 C 抗压强度的 97.9%。随着钢纤维掺量继续增加,钢纤维再生混凝土抗压强度反而下降。当掺量增加到 2.0% 时,抗压强度为 29.19 MPa,比素混凝土抗压强度下降了 30.8%。

可见,钢纤维掺量为 1.0% 时,对再生混凝土的抗压强度改善最有效,其抗压强度达到素混凝土的 90% 以上,但过多的钢纤维反而会降低混凝土强度。

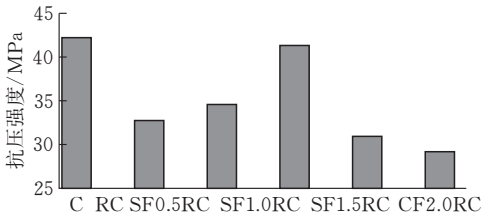


图 1 不同试样抗压强度对比

2.1.2 抗压破坏形态分析 试验观察可知,再生混凝土的试验过程现象和素混凝土类似,但是再生混凝土侧面脱落现象更加严重。而掺入钢纤维的再生混凝土试样在加载过程中,裂缝出现时间延后,随着

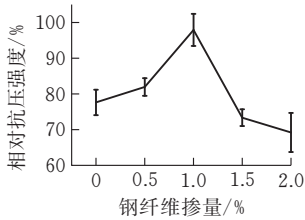


图 2 再生混凝土相对素混凝土抗压强度

加载时间持续,裂缝比素混凝土出现得多,但是裂缝相对较小,钢纤维再生混凝土破坏时也会“嘣”地一声,但是声音较沉闷,破坏时的裂缝大多数没有呈现贯穿状,而且侧面脱落混凝土较少,这是因为再生混凝土中掺入钢纤维,钢纤维在破坏界面处形成一道连接,阻碍了裂缝宽度的进一步发展。抗压试验试样破坏见图 3。

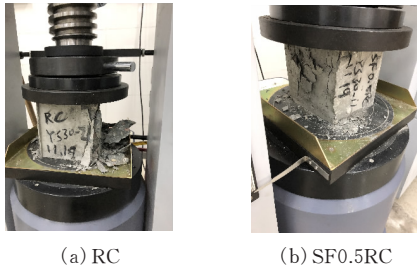


图 3 抗压试验试样破坏图

2.2 劈裂抗拉试验结果与分析

2.2.1 劈裂抗拉强度分析 从图 4 可以看出,C 的劈拉强度为 3.08MPa,RC 的劈拉强度明显低于 C。由图 5 可知,RC 的劈裂抗拉强度较 C 降低了 20.5%,在 RC 中掺入 0.5% 的钢纤维后,SF0.5RC

的劈裂抗拉强度相比 C 降低了仅 6.8%，当钢纤维掺量增加至 1.0% 后，SF1.0RC 的劈裂抗拉强度已经比 C 高出 22.7%，继续掺入钢纤维达到 1.5% 时，此时 SF1.5RC 的劈裂抗拉强度比 SF1.0RC 有所降低，但是相比 C 仍然提高了 8.1%，当钢纤维掺量达到 2.0% 时，SFRC 的劈裂抗拉强度比 C 提高了 6.2%，这说明钢纤维掺量到达一个临界点后，继续掺入钢纤维对再生混凝土的劈拉强度改善效果下降。

对比 SFRC 和 RC 的劈裂抗拉强度，当钢纤维掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 时，SFRC 的劈拉强度较 RC 分别提高了 17.3%、54.3%、36.0% 和 33.3%。可见，钢纤维的掺量对 RC 的劈拉强度有显著影响，当钢纤维掺量达到 1.0% 时，钢纤维再生混凝土的劈裂抗拉强度已经超过了素混凝土。钢纤维掺量为 1.0% 时，改善效果最佳，钢纤维掺量继续增加时对 RC 的劈裂抗拉强度改善效果减弱。

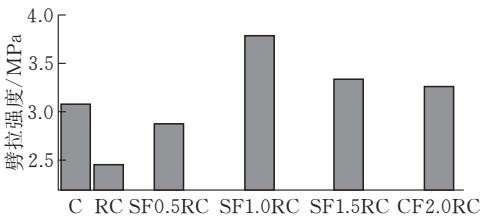


图 4 不同试样劈裂抗拉强度对比

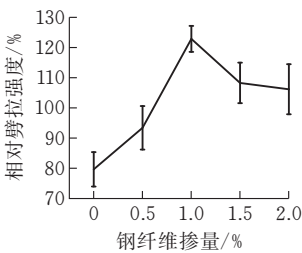


图 5 再生混凝土相对素混凝土劈拉强度

2.2.2 劈裂抗拉破坏形态分析 再生混凝土的劈裂抗拉试验现象与素混凝土类似，破坏时再生混凝土有中间裂为两半，断口处无其他次裂缝。钢纤维再生混凝土达到破坏荷载时没有出现突然劈裂现象，SF0.5RC 竖向中线出现了很明显的贯穿主裂缝，并在主裂缝旁出现了次生裂缝，用力将混凝土试样掰开可以看见裂开部位有钢纤维拉扯。SF1.0RC、SF1.5RC 以及 SF2.0RC 试样没有明显变化，只是在试样竖向中线附近可以看见一条从底部延伸至顶部的不明显的裂缝，且破坏后基本还保持着原有形态，说明钢纤维的掺入能有效改善混凝土脆性破坏的特征，钢纤维再生混凝土具有较好的韧性。各配合比试样破坏形态对比见图 6。

2.3 四点弯曲试验结果与分析

2.3.1 抗折强度分析 如图 7 所示，混凝土抗折强

度试验采用四点弯曲的加载方式，试验装置为 MTS 微机控制电子压力试验机，最大荷载为 100 kN。



图 6 各配合比试样劈裂抗拉破坏形态对比

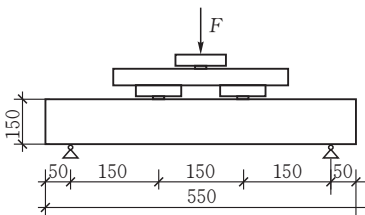


图 7 混凝土梁加载示意图

抗折强度随钢纤维掺量变化的曲线如图 8，C 的抗折强度要明显高于 RC。由图 9 可知，RC 较 C 的抗折强度大幅度降低，降低了 11.4%。加入 0.5% 体积掺量的钢纤维后，SF0.5RC 的抗折强度较 C 仅降低了 3.6%，已经比较接近 C 的抗折性能，加入 1.0% 体积掺量的钢纤维后，SF1.0RC 的抗折强度超过 C 的抗折强度 0.3%，继续增加钢纤维的掺量分别为 1.5% 和 2.0% 时，SF1.5RC 和 SF2.0RC 的抗折强度相比 C 分别下降了 4.6% 和 10.5%。综上所述，钢纤维的加入，能有效改善 RC 的抗折性能，弥补再生骨料对混凝土抗折性能的不利影响。

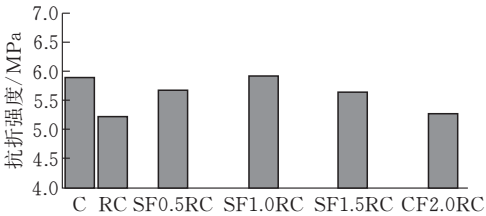


图 8 不同配合比试样抗折强度值

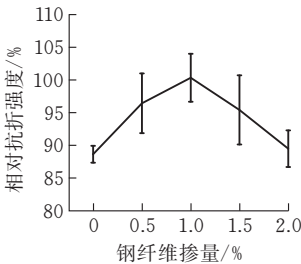


图 9 再生混凝土相对素混凝土抗折强度

对比 SFRC 和 RC，当钢纤维掺量为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 时，SFRC 较 RC 的抗折强度依次增加了 8.8%、13.2%、7.6% 和 1.0%，从数据中可以看出，SF1.0RC 的抗折性能最佳，使钢纤维再生混凝土的抗折性能达到素混凝土的抗折性能要求。

2.3.2 小梁试样破坏形态分析 各试样的荷载一位移曲线见图 10。从图 10 可以看出,C 和 RC 的荷载一位移曲线接近直线型上升,当达到荷载极值时,荷载值直接降为 0,“啪”地一声完全断裂为两段,无法继续承受荷载。在达到荷载极限前,SFRC 的荷载上升速度没有 C 和 RC 快,但位移较 C、RC 增大,而且 SF1.0RC 的极限荷载较 C 有所提升,这说明掺入钢纤维,弥补了因再生骨料的加入而导致的混凝土抗折能力降低;SFRC 在达到极限荷载后,荷载值并没有突降为 0,荷载是先陡降随后缓慢降低。钢纤维再生混凝土小梁在试验中表现的脆性特征不明显,当加载至极限荷载的 60%左右时,混凝土发出细微的声响,开始有一条主裂缝出现,随着荷载的增加,逐渐出现细微的次裂缝。破坏时有沉闷的断裂声,断裂面呈现锯齿形,小梁上半部分保持着较好的整体性,且随着钢纤维掺量的增加,小梁在破坏时的完整性越来越好。各配合比小梁试样破坏形态见图 11,C 和 RC 破坏骨料和水泥胶体都被切断,SFRC 骨料和水泥胶体被破坏的同时,部分钢纤维没有被切断,SFRC 相比于 RC 具有了一定的韧性,弥补了再生混凝土脆性断裂的缺点,破坏之后还有一定的残余强度,仍然可以继续承受荷载直至小梁被完全折断。

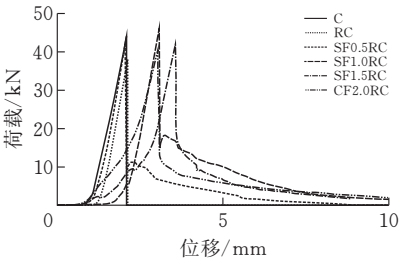


图 10 四点弯曲荷载一位移曲线图

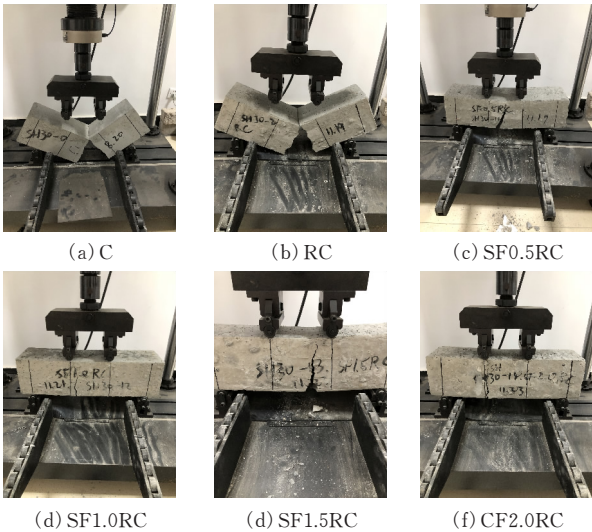


图 11 小梁试样破坏形态

3 结论

对素混凝土 C、再生混凝土 RC 以及不同钢纤维掺量的再生混凝土 SFRC 进行了抗压强度、劈裂抗拉强度和四点弯曲抗折试验对比研究,并分析了各个试样的破坏形态,主要结论如下:

- 1)RC 相比 C,其力学性能降低明显,抗压强度降低了 22.4%,劈拉强度降低了 20.5%,抗折强度降低了 11.4%。
- 2)钢纤维的掺入对再生混凝土力学性能都有一定的改善,其中对劈拉强度和抗折强度改善更为明显。SFRC 的力学性能随着钢纤维掺量的增加均呈现先增加后减小的趋势,这说明合适的钢纤维体积掺量才能有效地增强 RC 的力学性能。
- 3)钢纤维掺量为 1.0%时,SFRC 的抗压强度接近 C 的抗压强度,劈拉强度和抗折强度都超出素混凝土,这说明钢纤维掺量为 1.0%时,能弥补因加入再生骨料而导致的混凝土强度的降低。

[参 考 文 献]

[1] 吴贤国,郭劲松,李惠强,等. 建筑废料的再生利用研究[J]. 建材技术与应用, 2004(1):21-23.

[2] 王城. 建筑寿命的影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

[3] 孙跃东,肖建庄. 再生混凝土骨料[J]. 混凝土, 2004 (6):33-36.

[4] 肖建庄,黎鹭,丁陶. 再生混凝土生命周期 CO₂ 排放评价[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016,46(5): 1088-1092.

[5] 乔宏霞,关利娟,曹辉,等. 再生骨料混凝土研究现状及进展[J]. 混凝土, 2017(7):77-82.

[6] Jing M. Study on the economic feasibility of recycled concrete[J]. Advanced Materials Research, 2012(573-574):203-206.

[7] Jianzhuang X, Wengui L, Yuhui F, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996 - 2011) [J]. Construction and Building Materials, 2012,31:364-383.

[8] 陈宝春,季韬,黄卿维,等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014,31(3):1-24.

[9] 李小慧. 纤维橡胶混凝土基本力学及耐久性能研究[J]. 建筑科学, 2016,32(7):118-122.

[10] 周佳媚,张迁,蒙国往,等. 钢纤维混凝土力学性能和弯曲韧性研究[J]. 铁道标准设计, 2017,61(8):84-90.

[11] 周继凯,毕枫桐,沈超,等. 不同掺量聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(11):23-26.

[12] 白敏,牛荻涛,姜磊,等. 钢纤维改善混凝土力学性能和微观结构的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013,32(10):

2084-2089.

[13] 薛国杰, 王传林, 张佳苗, 等. 钢纤维形状对高性能混凝土性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021: 1-15. [2021-02-10]. <http://doi.org/10-1380/j.cnki.fhclxb.20210210.003>.

[14] Senaratne S, Gerace D, Mirza O, et al. The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibres as a sustainable, structural material[J]. Journal of cleaner production, 2016, 112(JAN,20PT,4):2318-2327.

[15] 中华人民共和国城乡与住房建设部.JCJ 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.

[16] 中华人民共和国建设部.GB/T 50081—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.

[17] 大连理工大学.CECS 13—2009. 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

Experimental Study on Strength and Failure of Steel Fiber Recycled Concrete

ZHOU Chenxu, TAN Yan, ZHOU Jinzhi, HE Qi
(School of Civil Engineering, Architecture and Environment,
Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Recycled concrete is a kind of green concrete, but its mechanical properties are not as good as plain concrete (C). Adding steel to recycled concrete (RC) to make steel fiber recycled concrete is a modified recycled concrete that can improve the mechanical properties of RC. In this test, 36 standard specimens of steel fiber recycled concrete (SFRC) with dimensions of 150 mm×150 mm×150 mm were prepared for compressive strength and split tensile strength tests. At the same time, 72 specimens of 150 mm×150 mm×550 mm were prepared. The trabecular specimens were used for four-point bending test to study the effect of steel brazing steel content on the mechanical properties of recycled concrete, and through experimental observation and analysis of the failure morphology of each mix sample. The experimental results show that with the increase of the amount of steel fiber, the strength of recycled concrete increases first and then decreases. When the amount of steel fiber is 1.0%, the strength of recycled concrete increases the most. At the same time, the incorporation of steel fiber also enhances the toughness of recycled concrete and reduces dispersion.

Keywords: steel fiber; recycled concrete; mechanical properties; failure; fatigue life

[责任编辑: 裴 琴]