

# 废弃PP纤维再生混凝土基本力学性能试验

王建超<sup>1</sup>,李梦飞<sup>2</sup>,赵丰磊<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学理学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;

3. 苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 210017)

**摘要** 目的 针对纤维体积掺量、长径比、再生骨料取代率等因素,探究废弃PP纤维对再生混凝土力学性能的影响,提高废弃纤维利用率。**方法** 以废弃PP打包带制成不同长径比的纤维作为筋材,以不同体积掺量与不同再生骨料取代率的再生混凝土混合制成11组废弃PP纤维再生混凝土试块,对其进行抗压和抗拉试验。**结果** 立方体抗压、抗拉强度最佳时的废弃PP纤维体积掺量为1.5%,长径比为47.85;废弃PP纤维再生混凝土的立方体抗压、抗拉强度与再生骨料取代率有关,其强度与再生骨料取代率近似呈线性关系。**结论** 废弃PP纤维的掺入可以提高再生混凝土的立方体抗压强度和抗拉强度。

**关键词** 再生混凝土;废弃PP纤维;再生骨料取代率;力学性能

中图分类号 TU528

文献标志码 A

**引用格式:**王建超,李梦飞,赵丰磊. 废弃PP纤维再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):105-113. (WANG Jianchao, LI Mengfei, ZHAO Fenglei. Experiment on basic mechanical properties of waste PP fiber recycled concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):105-113.)

## Experiment on Basic Mechanical Properties of Waste PP Fiber Recycled Concrete

WANG Jianchao<sup>1</sup>, LI Mengfei<sup>2</sup>, ZHAO Fenglei<sup>3</sup>

(1. School of Science, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Jiangsu Transportation Institute Group, Nanjing, China, 210017)

**Abstract:** The work aims to explore the influence of waste PP fiber on the mechanical properties of recycled concrete according to the factors such as fiber volume content, aspect ratio and recycled aggregate replacement rate, so as to improve the utilization rate of waste fiber. Methods 11 groups of waste PP fiber recycled concrete test blocks were prepared by mixing waste PP fiber with different length-diameter ratio as reinforcement and recycled concrete with different volume content and different recycled aggregate replacement rate. The results showed that the volume fraction and length-diameter ratio of waste PP fiber were 1.5% and 47.85 respectively when the cube compressive strength and

收稿日期:2022-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52108235)

作者简介:王建超(1981—),男,副教授,博士,主要从事再生混凝土性能等方面研究。

splitting tensile strength were the best. At the same time, the cube compressive strength and tensile strength of waste PP fiber recycled concrete are also related to the replacement rate of recycled aggregate, and its strength is approximately linear with the replacement rate of recycled aggregate. The test proves that the incorporation of waste PP fiber can enhance the recycled concrete and affect the improvement of cube compressive strength and splitting tensile strength.

**Key words:** recycled concrete; waste PP fiber; replacement rate of recycled aggregate; mechanical properties

随着城市化进程的不断加快,我国每年要面临近 26 亿吨的建筑废弃混凝土<sup>[1]</sup>。利用废弃混凝土生产出再生骨料(Recycled Aggregates, RAs),从而用于再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)的配制,可以大大改善环境,解决天然资源浪费的问题。

目前,许多国内外学者对再生混凝土的力学性能已取得颇多研究成果。P. J. Nixon 等<sup>[2-4]</sup>研究指出:相同配合比情况下,再生混凝土的抗压、抗拉强度比普通混凝土低,且当再生骨料完全替代粗骨料时,强度比普通混凝土的强度低 10% ~ 32%; Y. B. Du 等<sup>[5]</sup>研究指出:随着再生骨料取代率的增加,再生混凝土在压缩破坏模式下无荷载表面形成的裂缝逐渐减少,抗拉破坏截面变得相对不平整,并伴有大量的混凝土碎片;同时,抗压强度和抗拉强度均随取代率的增加而减小。Z. J. Grdic 等<sup>[6]</sup>研究指出:尽管混凝土的抗压强度和抗拉强度有所下降,高质量的再生骨料仍能满足混凝土的使用要求。

众多国内外学者研究发现<sup>[7-12]</sup>,纤维作为一种增韧材料,在再生混凝土中掺入一定量的纤维可以显著改善自身缺陷,有效阻止裂缝增大,提高混凝土的整体性能,同时,加入纤维也可以在一定程度上提高再生混凝土的抗压、抗拉以及抗折强度<sup>[13-14]</sup>。聚丙烯

(Poly Propylene, PP)纤维作为一种合成纤维,有极高的性价比和耐久性能,同时可有效提高再生混凝土的抗裂性、抗渗性和抗冲击性<sup>[15-16]</sup>。但有关废弃 PP 纤维对再生混凝土抗压、抗拉强度等力学性能影响方面的研究较少。

综上所述,笔者通过废弃 PP 纤维再生混凝土力学性能试验,研究分析废弃 PP 纤维再生混凝土抗压、抗拉强度与纤维体积掺量、长径比和再生骨料取代率的关系;并根据试验数据拟合,提出废弃 PP 纤维再生混凝土轴心抗压强度、抗拉强度计算公式,为回收再利用工业废弃物 PP 打包带,并将其作为再生混凝土的增强增韧材料提供理论依据。

1 试验原材料与试验方案

1.1 试验材料

- 水泥:P. O42.5 级;
- 砂:普通天然砂(细度模数 2.6),粒径为 0 ~ 4.75 mm;
- 粗骨料:粒径为 5 ~ 20 mm;
- 再生骨料取自沈阳建筑大学结构试验室的废弃试验墙体,其回弹推定强度为 27.6 MPa,经破碎、筛分、清洗制备,尽量选用三轴尺寸相近的再生骨料,避免使用针片状的骨料,其物理性能指标见表 1。

表 1 再生骨料物理性能指标

Table 1 The physical performance of recycled coarse aggregate

粒径/mm	吸水率/%	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指标/%
5 ~ 20	2.68 ~ 3.05	2 353	1 457	12.7

试验采用的废弃 PP 纤维来自于 PP11005J 非标准型热熔机扎透明打包带,密

度为  $0.748\text{ g/cm}^3$ ,经人工裁剪成所需形态(见图 1)。依据《塑料拉伸性能试验方法》(GB/T 1040—92)对 PP 打包带进行拉伸试验,测得其拉伸应力—应变曲线如图 2 所示,其性能指标见表 2。

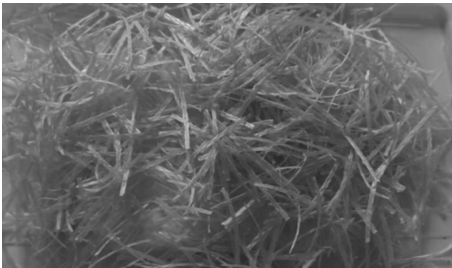


图 1 试验用 PP 纤维

Fig. 1 The PP fiber for testing

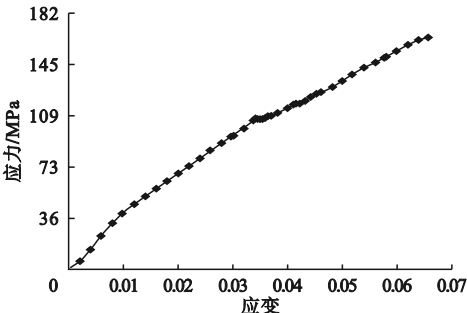


图 2 打包带应力—应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curve of PP band

表 2 PP 打包带性能指标  
Table 2 The performance of PP band

峰值荷 载/N	峰值应变	峰值应 力/MPa	弹性模 量/GPa
881	0.066	164.59	2.49

PP 纤维的尺寸采用精度为  $0.01\text{ mm}$  数显游标卡尺和钢卷尺进行测量,尺寸分布见图 3。其宽度平均值为  $1.72\text{ mm}$ ;厚度均在  $0.45\sim 0.55\text{ mm}$ ,平均值为  $0.5\text{ mm}$ ;计算得到其截面等效直径为  $1.046\text{ mm}$ ;每组纤维长度均值分别为  $30.02\text{ mm}$ 、 $39.77\text{ mm}$ 、 $50.07\text{ mm}$ 、 $58.94\text{ mm}$ ;长径比分别为  $28.69$ 、 $38.01$ 、 $47.85$ 、 $55.47$ 。

1.2 试验设计

设置变量为纤维体积掺量、纤维长径比和再生骨料取代率。为避免拌和过程中产生纤维砂浆团块,采用了较大的单位体积用水量和砂率,故骨料的用量减少,使纤维分布更均匀。再生粗骨料有较多的裂隙,在拌和物中会吸收骨料附近的水,故依据《再生混凝土应用技术规程》(DG/TJ08-2018—2007),在配合比中设置了附加水,如表 3 所示。

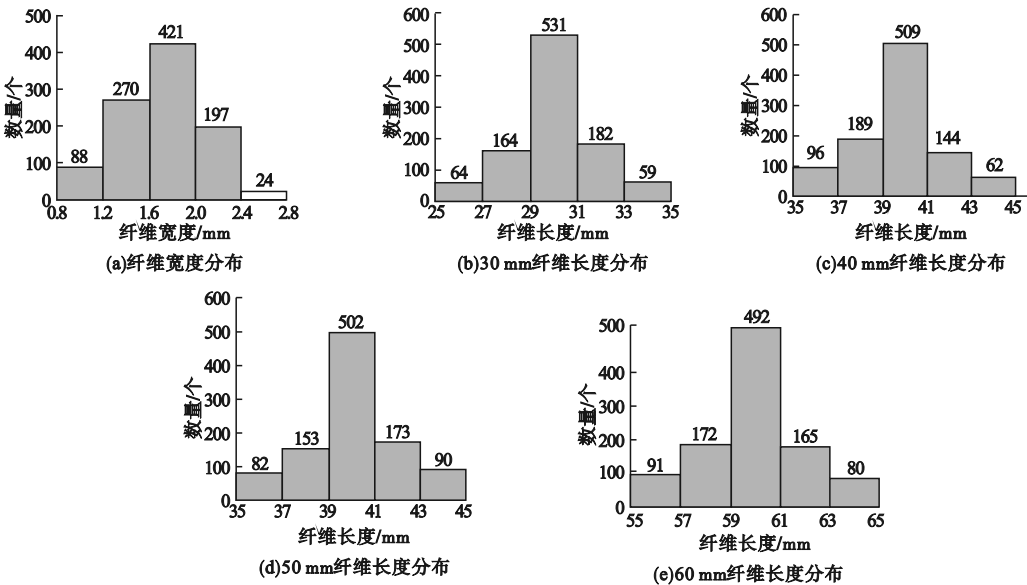


图 3 纤维尺寸分布图

Fig. 3 The diagrams of fiber size distribution

表3 各分组配合比

Table 3 The mixing proportion of each group

分组	$\rho(\text{水})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho(\text{水泥})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho(\text{砂})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho(\text{天然骨料})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho(\text{再生骨料})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho(\text{附加水})/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	纤维体积 掺量/%	纤维长 径比
RC-100-0	295	590	704.48	0	810.53	23.26	0	—
FRC-100-5-50	295	590	704.48	0	810.53	23.26	0.5	47.85
FRC-100-10-50	295	590	704.48	0	810.53	23.26	1.0	47.85
FRC-100-15-50	295	590	704.48	0	810.53	23.26	1.5	47.85
FRC-100-20-50	295	590	704.48	0	810.53	23.26	2.0	47.85
FRC-100-15-30	295	590	704.48	0	810.53	23.26	1.5	28.69
FRC-100-15-40	295	590	704.48	0	810.53	23.26	1.5	38.01
FRC-100-15-60	295	590	704.48	0	810.53	23.26	1.5	55.47
FRC-60-15-50	295	590	704.48	324.21	486.32	13.96	1.5	47.85
FRC-30-15-50	295	590	704.48	567.37	243.16	6.98	1.5	47.85
FNC-0-15-50	295	590	704.48	810.53	0	0	1.5	47.85

1.3 试件制作与试验方法

试件制作与试验方法均按照《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13—2009)和《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)的相关规定执行。立方体抗压强度、抗拉强度试验采用木模浇筑成的150 mm×150 mm×150 mm标准试块,共11组,每组3块,试验设备分别采用5 000 kN和600 kN压力机进行试验。轴心抗压强度试验采用150 mm×150 mm×300 mm标准试块,粘贴应变片,共11组,每组3块,试验设备采用2 000 kN压力机进行试验,相关的试验设备如图4~图7所示。废弃PP纤维再生混凝土的弹性模量、泊松比由应变片测出,应力应变全曲线、峰值应变由压力机自身的采集系统计算得到。

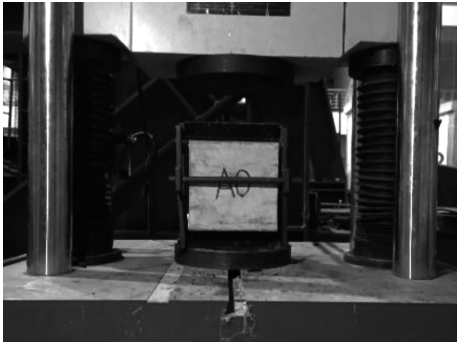


图5 抗拉强度加载设备

Fig. 5 The loading equipment for testing splitting tensile strength

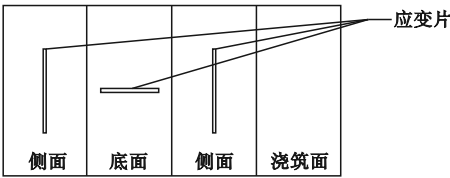


图6 应变片位置示意图

Fig. 6 The location diagram of strain gauge

2 试验结果与讨论

2.1 各因素对立方体抗压强度的影响

通过立方体抗压强度试验测得的数值如表4所示。纤维体积掺量、长径比、再生骨料取代率对立方体抗压强度的影响如图8~图10所示。



图4 立方体抗压强度加载设备

Fig. 4 The loading equipment for testing cube compressive strength



图 7 轴心抗压强度加载设备

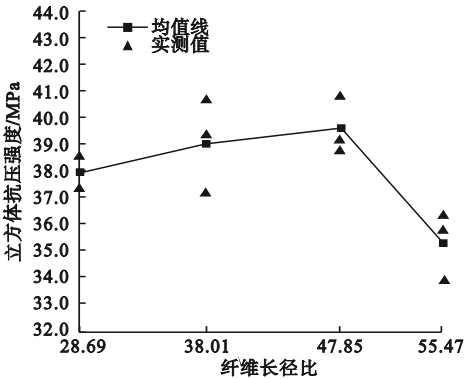


图 9 纤维长径比对立方体抗压强度的影响

Fig. 9 The influence of fiber length to diameter ratio on cube compressive strength

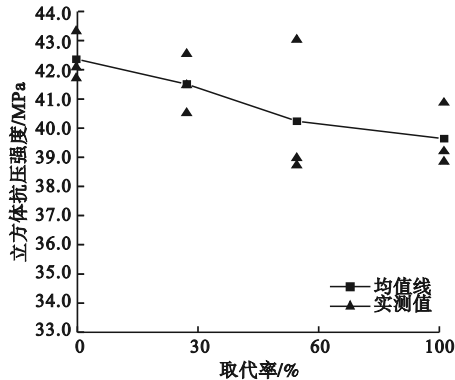


图 10 再生骨料取代率对立方体抗压强度的影响

Fig. 10 The influence of recycled aggregate substitution rate on cube compressive strength

由图 8 ~ 图 10 可以看出,废弃 PP 纤维再生混凝土的立方体抗压强度受纤维体积掺量、长径比和再生骨料取代率影响。已将三组实测值转化为均值线,具体表现为:随着纤维体积掺量和纤维长径比的不断提高,立方体抗压强度先增大后减小,在体积掺量为 1.5%,长径比为 47.85 时,立方体抗压强度最高;同时,随着再生骨料取代率的增加,立方体抗压强度逐渐减小。

依据《纤维混凝土结构技术规程》(CECS38:2004),纤维混凝土的立方体抗压强度可表示为

$$f_{cu,fc}=f_{cu}(1+\alpha_c\lambda_f). \tag{1}$$

$$\lambda_f=\rho_f l_f/d_f. \tag{2}$$

式中: $f_{cu,fc}$  为纤维混凝土抗压强度,MPa; $f_{cu}$  为基体混凝土抗压强度,MPa; $\lambda_f$  为纤维含量特

Fig. 7 The loading equipment for testing axial compressive strength

表 4 废弃 PP 纤维再生混凝土立方体抗压强度试验结果

Table 4 The test results of cube compressive strength of waste PP fiber recycled concrete

分组	抗压强度试验值/MPa	抗压强度计算值/MPa	相对误差/%
RC-100-0	34.9	34.9	0
FRC-100-5-50	35.7	35.172 64	-1.48
FRC-100-10-50	37.2	37.961 04	2.13
FRC-100-15-50	39.6	37.992 28	-4.16
FRC-100-20-50	35.7	35.831 84	0.37
FRC-100-15-30	38.0	38.639 04	1.82
FRC-100-15-40	39.1	39.028 94	-0.05
FRC-100-15-60	35.3	36.167 47	2.49
FRC-60-15-50	40.2	39.868 45	-0.92
FRC-30-15-50	41.5	41.275 58	-0.56
FNC-0-15-50	42.4	42.682 71	0.74

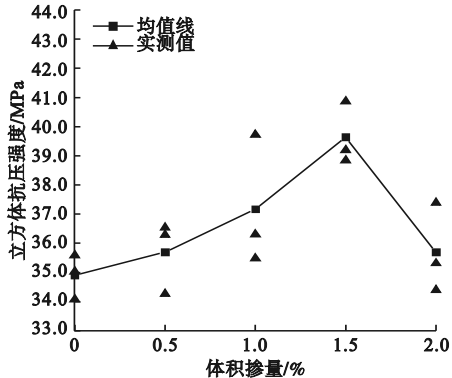


图 8 纤维体积掺量对立方体抗压强度的影响

Fig. 8 The influence of fiber volume fraction on cube compressive strength



征值; $\rho_f$  为纤维体积率,%; $l_f$  为纤维长度,mm; $d_f$  为纤维直径或等效直径,mm; $\alpha_c$  为纤维对纤维混凝土抗压强度的影响系数,宜通过试验确定。

为了便于废弃 PP 纤维再生混凝土的应用,笔者综合考虑纤维体积掺量、纤维长径比对参数  $\alpha$  和再生骨料取代率对废弃 PP 纤维再生混凝土强度的影响,对试验实测结果进行拟合,得出以下废弃 PP 纤维再生混凝土的立方体抗压强度计算公式:

$$f_{cu}=f_{cu,RAC}\times(-0.009\,615\times\delta+1.117\,62)\times\left[1+(-509.074\times V_{RPF}^2+10.768\times V_{RPF}^2-0.001\,45)\times\left(-0.127\,46\times\frac{L}{D}+8.443\,13\right)\times V_{RPF}\times\frac{L}{D}\right].\quad(3)$$

式中: $f_{cu,RAC}$  为未掺入废弃 PP 纤维,再生骨料取代率 100% 的再生混凝土的立方体抗压强度,MPa; $V_{RPF}$  为纤维体积掺量,%; $\delta$  为再生骨料取代率,%; $\frac{L}{D}$  为纤维长径比。

为了便于比较,将式(3)计算值列于表 4 中,可见误差较小,式(3)可用于废弃 PP 纤维再生混凝土立方体抗压强度的计算。

2.2 各因素对抗拉强度的影响

抗拉强度的试验结果见表 5。纤维体积掺量、长径比、再生骨料取代率对抗拉强度的影响如图 11 ~ 图 13 所示。

表 5 抗拉强度

Table 5 The splitting tensile strength

分组	劈裂抗拉强度 $f_{ts}/\text{MPa}$	抗拉强度计算 值 $f_{ts,c}/\text{MPa}$	相对误差/ %	$f_{ts}/f_{cu}$
RC-100-0	2.46	2.47	0.35	0.070 487
FRC-100-5-50	2.55	2.52	-1.16	0.071 429
FRC-100-10-50	2.69	2.74	1.69	0.072 370
FRC-100-15-50	2.98	2.96	-0.80	0.075 177
FRC-100-20-50	2.61	2.62	0.32	0.073 109
FRC-100-15-30	2.87	2.88	0.38	0.075 626
FRC-100-15-40	2.91	2.88	-0.97	0.074 520
FRC-100-15-60	2.79	2.78	-0.48	0.081 365
FRC-60-15-50	2.99	3.03	1.32	0.074 304
FRC-30-15-50	3.11	3.13	0.54	0.074 922
FNC-0-15-50	3.23	3.20	-0.81	0.076 233

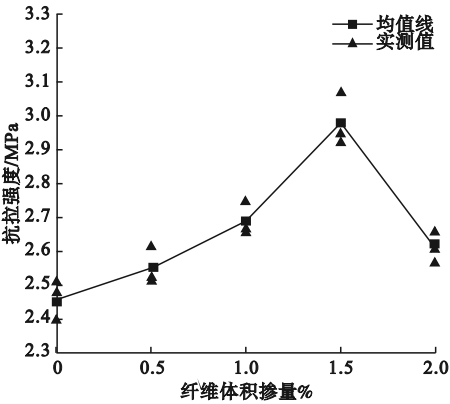


图 11 纤维体积掺量对抗拉强度的影响

Fig. 11 The influence of fiber volume fraction on splitting tensile strength

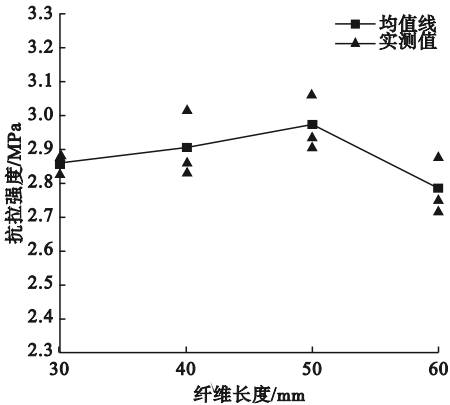


图 12 纤维长度对抗拉强度的影响

Fig. 12 The influence of fiber length on splitting tensile strength

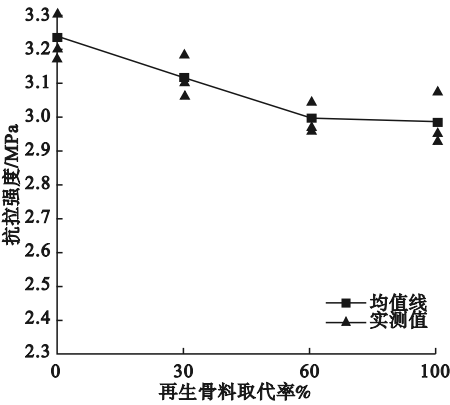


图 13 再生骨料取代率对抗拉强度的影响

Fig. 13 The influence of recycled aggregate substitution rate on splitting tensile strength

由图可知,废弃 PP 纤维再生混凝土抗拉强度随纤维体积掺量、纤维长径比、再生骨

料取代率的不同而变化。已将三组实测值转化为均值线,分析可知:随着纤维体积掺量和长径比的增加,抗拉强度先增大后减小,在纤维体积掺量为 1.5%、纤维长径比为 47.85 时,抗拉强度最高;同时,再生骨料取代率与抗拉强度大致呈反比,取代率为 30%、60%、100% 时,其抗拉强度较取代率为 0% 时分别降低了 3.72%、7.43%、7.74%。

过镇海等<sup>[17-18]</sup>研究了普通混凝土抗拉强度,并给出了指数函数形式的抗拉强度计算公式:

$$f_{ts}=\alpha f_{cu}^{\beta}.$$

(4)

为了利于废弃 PP 纤维再生混凝土的工程应用,笔者对表 5 的试验数据进行拟合,提出以下综合考虑了纤维体积掺量、长径比和再生骨料取代率的废弃 PP 纤维再生混凝土抗拉强度与立方体抗压强度的转换公式:

表 6 各组试块轴心抗压强度

Table 6 The axial compressive strength of each test block

分组	轴心抗压强度 实测值 $f_c$ /MPa	轴心抗压强度 计算值 $f_{c,cal}$ /MPa	$f_c/f_{cu}$	相对误差/ %
RC-100-0	25.8	26.012 37	0.737 277	0.71
FRC-100-5-50	26.8	26.608 64	0.758 722	-0.81
FRC-100-10-50	27.8	27.704 29	0.732 78	-0.46
FRC-100-15-50	29.6	29.545 28	0.759 971	-0.11
FRC-100-20-50	26.8	26.608 64	0.752 332	-0.63
FRC-100-15-30	28.1	28.285 65	0.749 488	0.55
FRC-100-15-40	29.2	29.105 53	0.741 378	-0.28
FRC-100-15-60	26.6	27.048 39	0.747 354	1.82
FRC-60-15-50	30.1	29.992 48	0.734 300	-0.32
FRC-30-15-50	31.3	30.939 06	0.732 517	-1.02
FNC-0-15-50	31.3	31.580 06	0.743 174	0.77

由图可知,废弃 PP 纤维再生混凝土轴心抗压强度受纤维体积掺量、纤维长径比、再生骨料取代率的影响。已将两组组实测值数据转化为均值线,分析可知:①轴心抗压强度随纤维体积掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,并在纤维体积掺量为 1.5% 时最大;②轴心抗压强度随长径比的提高呈现先增大后

$$f_{ts}=f_{cu}^{0.681\ 29}\times(-8\ 600.181\ 54\times V_{WPF}^3+222.054\ 61\times V_{WPF}^2-0.797\ 45\times V_{WPF}+0.091\ 52)\times$$
$$\left[0.043\ 36\times\left(\frac{L}{D}\right)^2-3.365\ 02\times\frac{L}{D}+292\ 962\ 48\right]\times$$
$$(-0.000\ 37\times\delta+0.010\ 74).$$

(5)

式中: $f_{cu}$ 为基体混凝土抗压强度,MPa; $V_{WPF}$ 为纤维体积掺量,%; $\frac{L}{D}$ 为纤维长径比; $\delta$ 为再生骨料取代率,%。

通过式(5)得出的计算结果见表 5。由表可知,式(5)计算值精度较好,误差均在 2% 以内。

2.3 各因素对轴心抗压强度的影响

根据棱柱体轴心抗压强度试验,得到轴心抗压强度的数据如表 6 所示。轴心抗压强度与纤维体积掺量、长径比和再生骨料取代率的关系如图 14 ~ 图 16 所示。

减小的趋势,在纤维长径比为 47.85 时最大;纤维长径比为 28.69、38.01、47.85 和 55.47 时,其轴心抗压强度较再生混凝土分别提高了 8.91%、13.00%、14.51% 和 2.85%;③再生骨料取代率与轴心抗压强度近似呈反比关系,再生骨料取代率为 30%、60% 和 100% 时的轴心抗压强度相较于取代率为 0 时,分

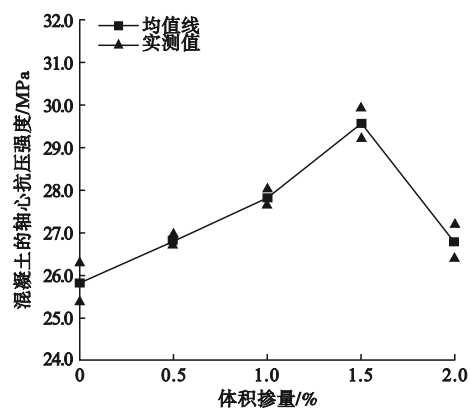


图 14 纤维体积掺量的影响曲线

Fig. 14 The influence of fiber volume content

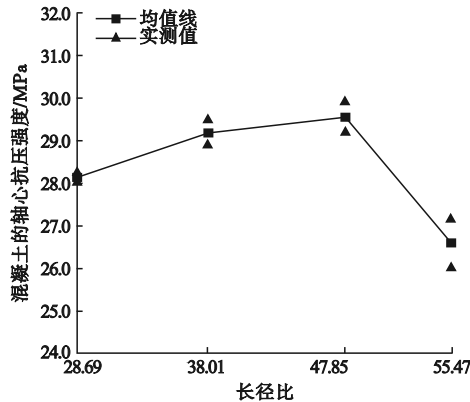


图 15 纤维长径比的影响曲线

Fig. 15 The influence of fiber aspect ratio

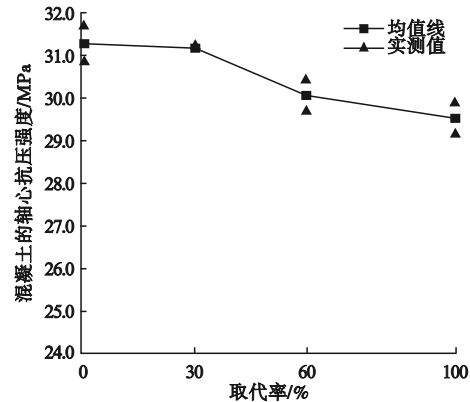


图 16 再生骨料取代率的影响曲线

Fig. 16 The influence of replacement rate of reclaimed aggregate

和立方体抗压强度影响相近,故笔者对轴心抗压强度和立方体抗压强度实测值进行线性拟合,提出如下废弃 PP 纤维再生混凝土的轴心抗压强度和立方体抗压强度间的线性转换公式:

$$f_c = 0.745\ 34 \times f_{cu} \tag{6}$$

式中: $f_c$ 为废弃 PP 纤维再生混凝土轴心抗压强度,MPa; $f_{cu}$ 为废弃 PP 纤维再生混凝土立方体抗压强度,MPa。

通过式(6)得出的计算值及相对误差见表 6。由表可知,计算相对误差在 2% 以内,精度较好。

### 4 结 论

(1)在试验参数范围内,掺入废弃 PP 纤维可以提高再生混凝土的轴心抗压强度和抗拉强度,从而增强再生混凝土的力学性能。

(2)随着纤维体积掺量的增加,立方体抗压强度和抗拉强度表现为先提高后降低;体积掺量为 1.5% 时,废弃 PP 纤维对立方体抗压强度和抗拉强度改善效果最佳。

(3)随着长径比的增加,立方体抗压强度和抗拉强度表现为先增大后减小;长径比为 47.85 时,废弃 PP 纤维对再生混凝土的立方体抗压强度和抗拉强度改善效果最佳。

(4)随着再生骨料取代率的增加,废弃 PP 纤维再生混凝土的各项基本力学性能均随之降低。

(5)轴心抗压强度随纤维体积掺量的增加而先增大后减小,抗压强度最佳时的体积掺量为 1.5%;随纤维长径比的增大而先增大后减小,抗压强度最佳时的长径比为 47.85;随再生骨料取代率的增大而降低,近似于线性关系。

(6)对试验数据进行拟合后,所提出的废弃 PP 纤维再生混凝土立方体抗压强度、抗拉强度以及轴心抗压强度的计算公式与试验结果吻合度较好。

别降低了 0.26%、3.99% 和 5.63%。废弃 PP 纤维再生混凝土的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值在 0.73 ~ 0.76,由于各参数对废弃 PP 纤维再生混凝土轴心抗压强度



## 参考文献

- [1] XU G L, SHEN W G, ZHANG B L, et al. Properties of recycled aggregate concrete prepared with scattering-filling coarse aggregate process [J]. Cement and concrete composites, 2018, 93: 19–29.
- [2] NIXON P J. Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review [J]. Materials and structures, 1978, 11(6): 371–378.
- [3] RAO M C, BHATTACHARYYA S K, BARAI S V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete [J]. Materials & structure, 2011, 44(1): 205–220.
- [4] DABHADE A N, CHOUDHARI S R, GAJBHIYE A R. Performance evaluation of recycled aggregate used in concrete [J]. International journal of engineering research and applications, 2012, 4(2): 1387–1391.
- [5] DU Y B, ZHAO Z Q, XIAO Q, et al. Experimental study on the mechanical properties and compression size effect of recycled aggregate concrete [J]. Materials, 2021, 14(9): 1–19.
- [6] GRDIC Z J, TOPLICIC-CURCIC G A, DESPOTOVIC I M, et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate [J]. Construct build materials, 2010, 24(7): 1129–1133.
- [7] AMER A A M, EZZIANE K, ADJOUDJ M. Evaluation of coarse recycled concrete aggregates effect on the properties of fresh and hardened concrete [J]. Asian journal of civil engineering, 2021, 22(3): 1173–1184.
- [8] KHAN A. Recycled concrete: a source for new aggregate [J]. Cement and concrete composites, 1984, 6(1): 17–27.
- [9] 胡金生, 杨秀敏, 周早生, 等. 钢纤维混凝土与聚丙烯纤维混凝土材料冲击荷载下纤维增韧特性试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005(2): 101–105.  
(HU Jinsheng, YANG Xiumin, ZHOU Zaosheng, et al. Experimental study on tenacity increase characteristics of steel fiber reinforced concrete and polypropylene fiber reinforced concrete under impact load [J]. Journal of building structures, 2005(2): 101–105.)
- [10] 丁一宁, 曹继锋. 聚丙烯长纤维高性能混凝土性能研究 [J]. 大连理工大学学报, 2007(5): 707–711.  
(DING Yi'ning, CAO Jifeng. Experimental study of behaviour of modified macro-polypropylene fiber reinforced high performance concrete [J]. Journal of Dalian university of technology, 2007(5): 707–711.)
- [11] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 14–21.  
(DENG Zongcai, FENG Qi. Fracture properties of hybrid fibers reinforced reactive powder concrete [J]. Journal of building materials, 2016, 19(1): 14–21.)
- [12] TENG S, VAHID A, OSTERTAG C P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete [J]. Construction & building materials, 2018, 182: 504–515.
- [13] 于俊超, 赵庆新, 李迎华, 等. 聚丙烯粗纤维对混凝土徐变性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(9): 1723–1728.  
(YU Junchao, ZHAO Qingxin, LI Yinghua, et al. Effect of polypropylene macro-fiber on creep behavior of concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(9): 1723–1728.)
- [14] 周龙, 闫治国, 朱合华, 等. 深埋排水盾构隧道钢纤维混凝土高刚性接头受力特性试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 177–183.  
(ZHOU Long, YAN Zhiguo, ZHU Hehua, et al. Experimental study on mechanical characteristics of high-stiffness segmental joint with steel fibers for deep-buried drainage shield tunnels [J]. Journal of building structures, 2020, 41(4): 177–183.)
- [15] 许金余, 白二雷. 纤维混凝土及其在防护工程中的应用 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(4): 1–11.  
(XU Jinyu, BAI Erlei. Review of fiber reinforced concrete and its application in protection engineering [J]. Journal of air force university of engineering (natural science edition), 2019, 20(4): 1–11.)
- [16] 殷石, 陈发兵, 闵锐, 等. 高强度改性合成粗纤维在国际工程中的应用案例 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018(6): 51–55.  
(YIN Shi, CHEN Fabing, MIN Rui, et al. Application case of high strength modified synthetic crude fiber in international engineering [J]. China concrete and cement products, 2018(6): 51–55.)
- [17] 过镇海, 张秀琴. 混凝土受拉应力应变全曲线的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1988, 9(4): 30–35.  
(GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Experimental study on the complete tensile stress-strain curve of concrete [J]. Journal of building structures, 1988, 9(4): 30–35.)
- [18] 周静海, 张东, 杨永生. 废弃纤维再生混凝土梁受弯性能试验 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 290–296.  
(ZHOU Jinghai, ZHANG Dong, YANG Yongsheng. Test study on flexural properties of waste fiber recycled concrete beams [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(2): 290–296.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)