

文章编号: 1001-4888(2023)05-0634-11

# 聚乙烯醇纤维高强再生混凝土梁抗弯性能研究\*

牛海成<sup>1</sup>, 高锦龙<sup>2</sup>, 李国利<sup>3</sup>, 尚天宇<sup>1</sup>, 黄明晖<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454000; 2. 中建八局第二建设有限公司, 山东济南 250000;

3. 河南兴建工程咨询有限公司, 河南平顶山 467000)

**摘要:** 为研究聚乙烯醇纤维对高强再生混凝土梁抗弯性能的影响,以混凝土类型和聚乙烯醇纤维体积掺量为变化参数,通过5根试件的抗弯试验观察各试件表面裂缝发展情况和破坏特征,得到了各试件荷载-应变曲线和荷载-最大裂缝宽度曲线,并分析了不同参数对抗弯性能的影响。试验结果表明:各试验梁应变变化均符合平截面假定;再生混凝土梁开裂荷载比普通混凝土梁小,抗弯刚度和变形能力较差;掺入聚乙烯醇纤维可有效抑制裂缝的产生与快速发展,亦显著提高了再生混凝土梁的开裂荷载和抗弯刚度,增强了变形能力;与未掺入纤维的再生混凝土梁相比,当聚乙烯醇纤维体积掺量为0.2%时,开裂弯矩、初始刚度和延性系数分别提高了59.4%、15.2%和17.4%。基于试验数据,文中提出了聚乙烯醇纤维再生混凝土梁裂缝宽度计算公式,通过计算结果可知,计算值和实测值吻合较好。

**关键词:** 聚乙烯醇纤维; 再生混凝土梁; 开裂弯矩; 延性; 抗弯性能

**中图分类号:** TU375.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-204

## 0 引言

近年来,我国受旧建筑物拆迁以及自然灾害的影响,产生了大量废弃混凝土,目前对其最常见的回收方式是进行填埋处理,但这种传统的回收方法不仅会污染环境,还会占用大量土地<sup>[1]</sup>。而再生混凝土技术的应用不仅可减少废弃混凝土填埋对自然环境的污染,作为目前处理废弃混凝土的一种有效途径,还可减少天然石材的大量开采,具有节能环保的重要意义。但由于再生粗骨料具有强度和表观密度低、孔隙率和吸水率大等特点,同时受生产工艺的影响,其表面和内部会产生大量细微裂缝,使再生混凝土基本力学性能显著下降<sup>[2-6]</sup>。

尽管目前再生混凝土已被广泛应用于公路基层和垫层建设中<sup>[7]</sup>,但在建筑结构中的应用还较少。Zhang等<sup>[8]</sup>通过再生混凝土梁抗弯承载力分析发现,随着服役时间的增加,再生混凝土梁的抗弯承载力逐渐低于普通混凝土。为了提高再生混凝土的力学性能和促进其在建筑结构材料中的应用,国内外学者通过掺入玄武岩纤维<sup>[9]</sup>、钢纤维<sup>[10-11]</sup>、聚丙烯纤维<sup>[12]</sup>和聚乙烯醇纤维<sup>[13]</sup>等研究了不同纤维对再生混凝土力学性能的影响。其中,掺入聚乙烯醇纤维可显著提高再生混凝土的抗拉强度、韧性和弯曲性能<sup>[14-17]</sup>;同时,现有研究表明纤维对混凝土的增强作用主要包括两方面<sup>[18-19]</sup>:一方面,纤维的桥架作用抑制了再生混凝土裂缝的产生和发展;另一方面,纤维的掺入可提高再生混凝土的抗拉强度和韧性。Wang等<sup>[20]</sup>为了解决再生骨料混凝土韧性低、易开裂等问题,在再生骨料混凝土中掺入钢纤维和聚丙烯

\* 收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1904188); 河南省自然科学基金项目(182300410247); 河南理工大学博士基金项目(B2016-66)

通信作者: 高锦龙(1995-),男,硕士,助理工程师。主要从事再生混凝土方面的研究。Email: gaojinlong1994511@163.com

牛海成(1979-),男,博士,副教授。主要从事钢与混凝土组合结构方面的研究。Email: niuhch@126.com

纤维,并通过循环加载试验发现,峰值应力前,试件表面几乎未出现可见的裂纹,内部损伤较小;峰值应力后,随着宏观裂纹的出现,再生混凝土损伤迅速增加,而随着加载的继续,峰值应力出现显著下降,此后主裂纹处的纤维活化使荷载稳定,并且以小的速率下降。由以上文献综述发现,再生混凝土中掺入纤维可显著提高再生混凝土的性能,并基本能满足工程要求<sup>[21]</sup>。Mansoue等<sup>[22]</sup>研究了钢纤维体积掺量对纤维再生混凝土梁抗弯性能的影响,结果表明,当掺入2%钢纤维时,再生混凝土梁裂缝宽度减小、抗弯承载力有所提高、变形能力显著增强。Chaboki等<sup>[23]</sup>通过钢纤维再生混凝土梁的抗弯性能试验发现,掺入钢纤维抑制了再生混凝土梁裂缝的产生和发展,显著提高了抗弯承载力和延性。Weal等<sup>[24]</sup>以再生粗骨料取代率和玄武岩纤维体积掺量为参数,通过纤维再生混凝土梁抗弯试验发现,再生粗骨料取代率对再生混凝土梁抗弯承载力影响较小,而掺入玄武岩纤维的抗弯承载力和变形性能均显著提高。Karimipour等<sup>[25]</sup>进行了钢纤维和聚丙烯纤维再生混凝土梁的抗弯性能试验,结果表明,随着玄武岩纤维的掺入,再生混凝土梁的抗弯承载力显著提高,而钢纤维的掺入使抗弯承载力仅有小幅提高,但延性显著提高。

综上所述,目前国内外学者主要进行了钢纤维/聚丙烯纤维/玄武岩纤维再生混凝土梁的抗弯性能试验,而对聚乙烯醇纤维再生混凝土梁的试验研究尚鲜见报道,同时现有研究也表明,再生混凝土中掺入聚乙烯醇纤维后,可显著提高其力学性能。基于此,本文以再生粗骨料取代率和聚乙烯醇纤维体积掺量为参数,通过1根普通混凝土梁、1根再生混凝土梁和3根聚乙烯醇纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%和0.3%的再生混凝土梁抗弯试验,研究了不同变化参数对纤维再生混凝土梁抗弯性能的影响,以为纤维再生混凝土在建筑结构中的应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验选用的水泥为普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂,细度模数为2.78;再生粗骨料来自焦作市废弃的混凝土路面板,人工砸成大块经鄂式粉碎机粉碎后,筛分出粒径为5mm~25mm的骨料,并经清洗、晾干后得到;天然粗骨料也为相同粒径的连续级配碎石,再生粗骨料和天然粗骨料物理性能见表1;粉煤灰和矿粉分别采用II级粉煤灰和S95矿粉;纤维采用聚乙烯醇纤维(Polyvinyl alcohol fiber, PVA),纤维性能见表2;减水剂采用减水率为35%的聚羧酸高效减水剂。混凝土配合比见表3。由于再生混凝土吸水率较大,为保证再生混凝土的和易性,加入附加水20kg/m<sup>3</sup>。实测28d混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度和弹性模量见表4。

表1 粗骨料物理性能

Tab.1 Physical properties of coarse aggregate

类别	粒径范围/mm	含水率/%	吸水率/%	堆积密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	压碎指标
天然粗骨料	5~25	1.0	0.9	1681	2798	10.4
再生粗骨料	5~25	2.2	4.3	1274	2433	12.7

表2 PVA纤维性能

Tab.2 Physical and mechanical properties of PVA fibers

纤维种类	$d_f/\mu\text{m}$	$l/\text{mm}$	$v/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$f_{ty}/\text{MPa}$	$E_f/\text{GPa}$
PVA	15	19	1.27	1060	29

注: $d_f$ 为纤维直径; $l$ 为纤维长度; $v$ 为纤维密度; $f_{ty}$ 为纤维抗拉强度; $E_f$ 为纤维弹性模量。

表3 混凝土配合比  
Tab. 3 Mix ratio of concrete

混凝土 类型	材料含量/(kg·m <sup>-3</sup> )								
	水泥	细骨料	天然粗骨料	再生粗骨料	水	附加水	粉煤灰	矿粉	减水剂
普通	336.87	633.45	1126.15	0	154.00	0	48.13	96.25	2.41
再生	336.87	633.45	0	1126.15	154.00	20.00	48.13	96.25	2.41

表4 试件设计参数  
Tab. 4 Design parameters of specimens

试验编号	取代率/%	PVA纤维 掺量/%	立方体抗压强度 $f_{cu}$ /MPa	轴心抗压强度 $f_{co}$ /MPa	弹性模量 E/GPa	刚度 K /(kN·mm <sup>-1</sup> )
NCB	0	0	69.0	49.9	44.3	17.4
RCB	100	0	66.4	41.1	22.8	15.7
RCB-PVA-1	100	0.1	62.1	40.1	24.1	16.9
RCB-PVA-2	100	0.2	61.7	39.8	23.2	17.9
RCB-PVA-3	100	0.3	57.4	39.4	20.1	17.5

注:NCB代表再生粗骨料取代率为0%的普通混凝土梁;RCB代表再生粗骨料取代率为100%的再生混凝土梁;RCB-PVA-1代表PVA纤维掺量为0.1%的再生混凝土梁;RCB-PVA-2代表PVA纤维掺量为0.2%的再生混凝土梁;RCB-PVA-3代表PVA纤维掺量为0.3%的再生混凝土梁。

## 1.2 试件设计

设计了1根高强普通混凝土梁(以下简称普通梁)、1根高强再生混凝土梁(以下简称再生梁)和3根PVA纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%和0.3%的纤维高强再生混凝土梁,梁的截面尺寸为150mm×300mm,长度为2600mm,保护层厚度为20mm。试件基本尺寸如图1所示,设计参数见表3。梁上部纵向架立钢筋和底部纵向受拉钢筋分别为直径12mm和22mm的HRB400级钢筋,箍筋采用直径为6mm的HPB300级钢筋,两端部 $L/3$ ( $L$ 为梁的跨度)范围内箍筋间距为100mm(考虑到试件在加载过程中,可能会发生剪切破坏),跨中 $L/3$ 范围内箍筋间距为150mm。试件浇筑过程中,每个试件均预留3个150mm×150mm×150mm和6个150mm×150mm×300mm的标准试块,用于测定混凝土抗压强度和弹性模量。

钢筋性能根据《金属材料 室温拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)<sup>[26]</sup>对其进行标准拉伸试验,实测 $\Phi 12$ 和 $\Phi 22$ 钢筋屈服强度分别为475MPa和443MPa,抗拉强度分别为619MPa和584MPa, $\Phi 6$ 钢筋屈服强度为332MPa,抗拉强度为456MPa。

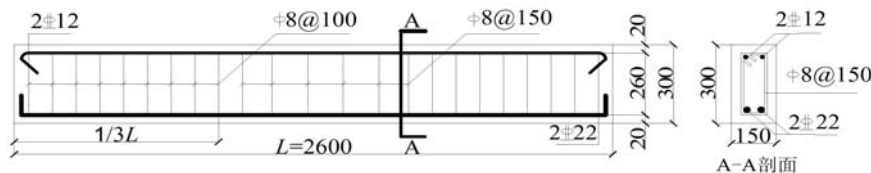


图1 试件基本尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of specimens (unit: mm)

## 1.3 加载方案及测量

试验采用四点弯曲加载,梁的竖向位移由梁底和梁顶各布置的一对支座(1个铰支座和1个固定支座)来实现,荷载由32t千斤顶提供,试验开始前在试验梁跨中沿高度方向等间距粘贴6个混凝土应变片,以量测加载过程中各级荷载作用下混凝土的应变发展情况。试件安装好后,在其底部和两端各布置1个百分表,以量测加载过程中各部分的竖向位移。每级荷载作用下的裂缝宽度用裂缝测宽仪量测。



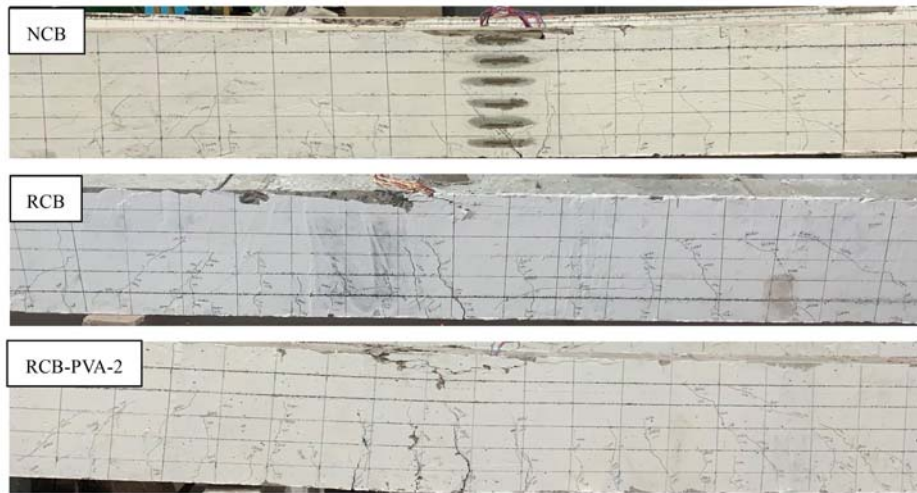


图4 典型破坏形态

Fig. 4 Typical failure mode for beams

已有裂缝不断向受压区延伸,跨中挠度和纵向受拉钢筋应变增长速度加快。接近峰值荷载时,纵向受拉钢筋均屈服。随着荷载的进一步增大,梁破坏,最大裂缝宽度为2.40mm。与未掺入纤维的再生梁RCB相比,掺入PVA纤维后,开裂荷载显著提高,相同荷载下,裂缝发展速度较慢,主裂缝数量增多,宽度减小,延伸高度下降。对于掺入纤维的再生梁,随着纤维体积掺量的增加,开裂荷载和每级荷载作用下的裂缝宽度均先增大后减小,而主裂缝数量逐渐增多。

## 2.2 荷载-应变曲线

图5为各试验梁荷载-纵向受拉钢筋应变曲线,图中 $\epsilon_y$ 为钢筋的屈服应变。

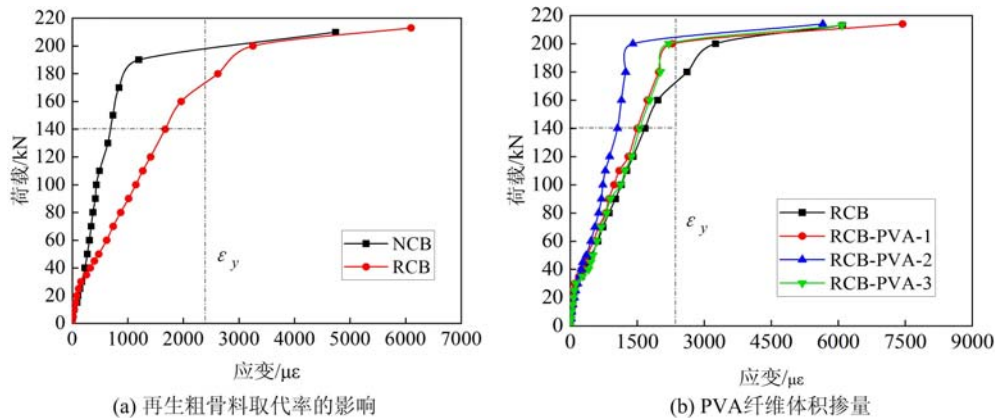


图5 荷载-应变曲线

Fig. 5 Load-strain curves

由图5(a)可以看出,荷载较小时,普通梁和再生梁钢筋应变增长缓慢。随着荷载增加,同级荷载下,再生梁应变增长速度显著大于同强度的普通梁。接近峰值荷载时,钢筋应变增长速度显著加快,很快钢筋应变达到屈服应变。

由图5(b)可以看出,峰值荷载70%之前,荷载-应变曲线大致为线性增长关系,但掺入PVA纤维的再生梁应变增长速度明显小于未掺入纤维的再生梁。当荷载增加至140kN(正常使用极限状态<sup>[27]</sup>对应的荷载)时,应变大小顺序为RCB>RCB-PVA-3>RCB-PVA-1>RCB-PVA-2。随着加载的继续,未掺入纤维的再生梁应变增长速度突然加快,而掺入PVA纤维的再生梁荷载与应变仍保持规律增长,其中,当PVA纤维体积掺量为0.2%时,应变增长速度最慢,应变显著小于未掺入纤维再生梁钢筋的应变,其主要原因是纤维的桥联作用分担了钢筋承受的一部分拉应力,减缓了钢筋应变的快速增长,提高了再生混凝土的抗拉强度,从而增强了再生梁的变形能力。

由图5还可知,荷载较小时,掺入PVA纤维的再生梁和普通梁刚度均大于未掺入纤维的再生梁。随着PVA纤维体积掺量的增加,刚度先增大后减小,但均大于未掺纤维的再生梁。但无论是普通梁、再生梁还是纤维再生梁,加载后期,荷载增长均比较缓慢,钢筋拉应变均快速增长。

### 2.3 荷载-裂缝宽度曲线

图6为各试验梁荷载-最大裂缝宽度曲线。

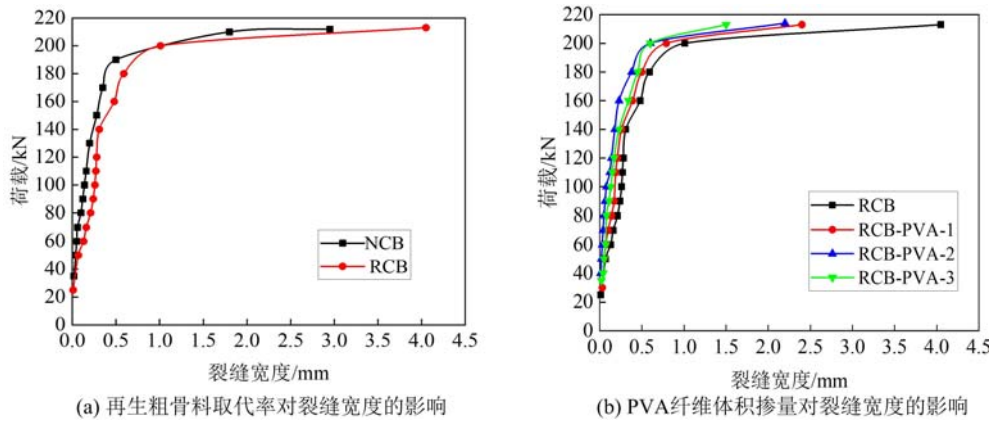


图6 荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig. 6 Load-maximum crack width curves

由图6可知,加载过程中梁均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。弹性阶段荷载与最大裂缝宽度均可视为线性关系。随着加载的继续,荷载-最大裂缝宽度曲线呈非线性关系,梁进入弹塑性阶段,裂缝发展速度加快。

由图6(a)可知,与同强度的普通梁相比,再生梁首条裂纹出现较早。荷载较小时,再生梁与普通梁裂缝发展程度相似。随着荷载的增加,再生梁裂缝发展速度明显大于普通梁。荷载为140kN(正常使用状态<sup>[27]</sup>下对应的裂缝宽度)时,与同强度的普通梁NCB相比,再生梁RCB最大裂缝宽度增大了33.3%。

由图6(b)可见,掺入PVA纤维的再生梁首条裂纹明显推迟。PVA纤维体积掺量为0.1%的梁,首条裂纹较窄,但PVA纤维体积掺量为0.2%和0.3%的梁,首条裂纹宽度与未掺入纤维的再生梁接近。

由图6(b)还可见,荷载较小时,各试验梁裂缝宽度较小。随着加载的继续,裂缝宽度逐渐增大,相同荷载下,掺入PVA纤维的再生梁裂缝宽度增长速度明显减缓,并随着PVA纤维体积掺量的增加,裂缝宽度呈先减小后增大的趋势,但均小于未掺入纤维的再生梁,其主要原因是跨越裂缝的PVA纤维对再生梁裂缝的发展起到了有效抑制作用。当PVA纤维体积掺量为0.2%时,纤维对裂缝的产生和发展抑制作用最显著。与未掺入纤维的再生梁相比,荷载为140kN时,PVA纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%和0.3%的再生梁,最大裂缝宽度分别减少了19.4%、50.0%和36.1%。

综上所述,与同强度的普通梁相比,未掺入纤维的再生梁裂缝出现更早,宽度更大;掺入PVA纤维可有效抑制裂缝的产生和发展,使裂缝宽度明显减小。

### 2.4 开裂弯矩

各试验梁开裂荷载和开裂弯矩见表5,表中 $P_c$ 为开裂荷载, $M_c$ 为开裂弯矩, $\Delta M$ 为开裂弯矩提高比率。

由表5可知,与同强度的普通梁相比,再生梁的开裂弯矩减小,其主要原因是再生粗骨料表面存在新旧砂浆界面和较多界面薄弱区,同时,受再生粗骨料破碎工艺的影响,内部存在细微裂缝等使得强度降低,文献[28]也得到类似的结论。不同体积掺量的PVA纤维均可提高再生梁的开裂弯矩,与未掺入纤维的再生梁相比,PVA纤维体积掺量分别为0.1%、0.2%和0.3%的再生梁开裂弯矩分别提高了19.8%、59.4%和39.5%,这表明掺入PVA纤维可显著提高再生梁的开裂弯矩,其主要原因是掺入PVA纤维后,纤维缠绕在再生粗骨料和钢筋表面,增强了再生粗骨料、水泥砂浆和钢筋三者之间的黏结

性能,使其抗拉强度提高,开裂弯矩增大。

表 5 各试件开裂弯矩试验结果

Tab. 5 The experimental results of cracking moment of specimens

试验编号	$P_{cr}/\text{kN}$	$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$\Delta M/\%$
NCB	35.0	13.4	39.5
RCB	25.0	9.6	0.0
RCB-PVA-1	30.0	11.5	19.8
RCB-PVA-2	40.0	15.3	59.4
RCB-PVA-3	35.0	13.4	39.5

## 2.5 初始刚度

刚度是反映构件抵抗受力变形的一种能力,本文刚度统一取荷载-挠度曲线上升段  $0.4F$  ( $F$  为抗弯承载力)对应点的割线刚度作为初始刚度<sup>[29]</sup>,其计算结果见表 4。

由表 4 可知,普通梁 NCB 初始刚度显著大于再生梁 RCB,主要原因是实测普通混凝土弹性模量大于实测再生混凝土弹性模量,与 NCB 相比,RCB 初始刚度降低了 10.8%;与 RCB 相比,掺入 PVA 纤维的再生梁初始刚度显著增大,且当纤维体积掺量为 0.2% 时,初始刚度增幅最大。与 RCB 相比,刚度增大了 15.2%,说明合理掺入 PVA 纤维能显著提高再生梁的初始刚度。

## 2.6 延性

各试件的变形能力用挠度延性系数  $\mu$  来表征,陈宗平等<sup>[29]</sup>通过抗弯试验发现,大部分试件荷载-挠度曲线没有明显下降段,因此,挠度延性系数  $\mu$  按文献<sup>[29]</sup>给出的方法计算,具体计算见式(1)。

$$\mu = \Delta_p / \Delta_y \quad (1)$$

式中:  $\Delta_p$  为峰值挠度;  $\Delta_y$  为屈服挠度。各试件挠度延性系数计算结果见表 6。

表 6 各试件特征点挠度及延性系数

Tab. 6 Characteristic deflection and ductility coefficient of specimen

试验编号	$\Delta_y/\text{mm}$	$\Delta_p/\text{mm}$	$\mu$
NCB	11.15	30.80	2.76
RCB	13.55	34.91	2.58
RCB-PVA-1	12.63	35.21	2.79
RCB-PVA-2	12.31	37.35	3.03
RCB-PVA-3	13.23	40.12	3.03

由表 6 可知,与普通梁 NCB 相比,再生梁 RCB 的挠度延性系数降低了 6.5%,说明再生混凝土梁变形能力较差;当掺入体积掺量分别为 0.1%、0.2% 和 0.3% 的 PVA 纤维时,与未掺入纤维的再生梁 RCB 相比,挠度延性系数分别提高了 8.1%、17.4% 和 17.4%,说明合理掺入 PVA 纤维可显著提高再生混凝土梁的延性,增强变形性能。

## 2.7 平截面假定验证

为了验证掺入 PVA 纤维与未掺入纤维的再生梁混凝土应变沿截面高度的变化是否符合平截面假定,跨中沿梁高等间距粘贴了 6 个混凝土应变片,以量测不同荷载作用下各测点混凝土应变沿梁高的分布规律。典型试件的混凝土应变发展曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,未掺入 PVA 纤维和掺入 PVA 纤维的再生梁应变发展规律与普通梁 NCB 应变发展规律基本一致,均符合平截面假定。与普通混凝土梁相比,未掺入 PVA 纤维的再生梁 RCB 截面中性轴有所下移,受压区高度增大。而掺入 PVA 纤维的再生梁与未掺入纤维的梁 RCB 相比,截面中性轴上移,受压区高度减小。



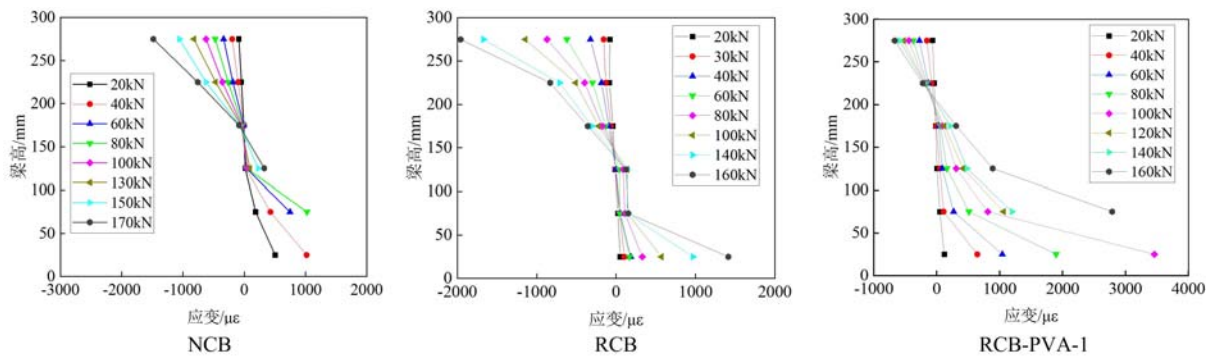


图 7 梁跨中截面应变发展曲线  
Fig. 7 Mid-span cross-section strain curves of beams

### 3 最大裂缝宽度计算

由 2.3 节的分析可知,再生混凝土中掺入 PVA 纤维可有效抑制梁裂缝的产生和发展,纤维再生混凝土梁最大裂缝宽度计算应考虑 PVA 纤维对再生梁的影响,基于此,参考文献[30-31],提出了 PVA 纤维混凝土梁最大裂缝宽度的计算公式如下:

$$\omega_{pmax} = \omega_{max} (1 - \beta_p \lambda_f) \tag{2}$$

式中:  $\omega_{pmax}$  为 PVA 纤维混凝土梁最大裂缝宽度;  $\omega_{max}$  为《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)<sup>[32]</sup> 中给出的普通钢筋混凝土构件最大裂缝宽度;  $\beta_p$  为 PVA 纤维对纤维混凝土梁裂缝宽度的影响系数;  $\lambda_f$  为 PVA 纤维含量特征值。

利用 Origin 软件对实测数据进行线性回归分析,得到  $\beta_p$  为 0.45。

$$\omega_{max} = \partial_{cr} \psi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} (1.9 C_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}})$$

$$\psi = 1.1 - \frac{0.65 f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sq}}; \sigma_{sq} = \frac{M_q}{0.87 h_0 A_a}$$

式中:  $\partial_{cr}$  为构件受力特征系数,对于受弯构件  $\partial_{cr}$  取 1.9;  $\psi$  为裂缝之间混凝土协调钢筋抗拉工作的程度,当  $\psi > 1.0$  时,取 1.0,  $\psi < 0.2$  时,取 0.2;  $\sigma_{sq}$  为纵向受拉钢筋的应力;  $E_s$  为钢筋的弹性模量;  $C_s$  为保护层厚度,当  $C_s < 20\text{mm}$  时,取 20mm,  $C_s > 65\text{mm}$  时,取 65mm;  $d_{eq}$  为受拉纵筋的等效直径;  $\rho_{te}$  为构件的有效配筋率;  $f_{tk}$  为混凝土抗拉强度标准值;  $M_q$  为梁的跨中弯矩;  $h_0$  为截面有效高度;  $A_a$  为纵向受拉钢筋的总截面积。

为了验证本文给出公式的可靠性和适用性,采用式(2)计算了文献[30]的 6 根梁和本文的 5 根 PVA 纤维再生混凝土梁的最大裂缝宽度,计算值和实测值对比见表 7,表中  $\omega$  为最大裂缝宽度实测值,  $\omega_c$  为最大裂缝宽度计算值。

式(2)考虑了 PVA 纤维对裂缝宽度的影响,引入了 PVA 纤维含量特征值,由表 7 可知,计算均值  $\omega/\omega_c$  为 1.023,变异系数为 0.059,说明计算值和实测值吻合较好。

### 4 结论

- (1) 掺入聚乙烯醇纤维的再生混凝土梁与未掺入纤维的再生混凝土梁均符合平截面假定。
- (2) 再生混凝土梁与普通混凝土梁相比,裂缝出现较早,数量较多,且前者初始刚度和变形性能较差。与普通混凝土梁相比,再生混凝土梁初始刚度和挠度延性系数分别降低了 10.3% 和 6.5%。
- (3) 掺入聚乙烯醇纤维后,可有效抑制再生混凝土梁裂缝的产生和进一步扩展,初始刚度、开裂弯矩和变形性能均显著提高。
- (4) 随着聚乙烯醇纤维体积掺量增加,刚度、开裂弯矩和延性均先增大后减小。尤其是当掺入 2%



表 7 裂缝宽度计算值与实测值对比  
Tab. 7 Comparison of calculation and experimental values of crack width

文献来源	试件编号	$w/mm$	$w_c/mm$	$w/w_c$
本文	NCB	0.243	0.246	0.988
	RCB	0.298	0.248	1.202
	RCB-PVA-1	0.231	0.234	0.987
	RCB-PVA-2	0.201	0.206	0.976
	RCB-PVA-3	0.216	0.221	0.977
文献[30]	L-2	0.117	0.113	1.035
	L-3	0.106	0.102	1.039
	L-4	0.998	0.997	1.001
	L-5	0.900	0.895	1.005
	L-6	0.146	0.144	1.014
	L-7	0.162	0.157	1.031

聚乙烯醇纤维时,刚度、开裂弯矩和延性分别提高了 59.4%、15.2% 和 17.4%,最大裂缝宽度减小了 50.0%。

(5) 考虑聚乙烯醇纤维对再生混凝土梁裂缝宽度的影响,本文提出了聚乙烯醇纤维再生混凝土梁最大裂缝宽度计算公式,计算结果与实测结果吻合较好。

#### 参考文献:

- [1] 梁超锋,何佳俊,肖建庄,等.再生骨料混凝土梁的阻尼性能及其机理分析[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):737-743,750(LIANG Chaofeng, HE Jiajun, XIAO Jianzhuang, et al. Damping property and mechanism analysis of recycled aggregate concrete beams[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(6):737-743, 750 (in Chinese))
- [2] Golafhani E M, Behnood A. Automatic regression methods for formulation of elastic modulus of recycled aggregate concrete[J]. Applied Soft Computing, 2018(64):377-400.
- [3] Chen Z P, Xu J J, Chen Y L, et al. Recycling and reuse of construction and demolition waste in concrete-filled steel tubes; a review[J]. Construction and Building Materials, 2016(126):641-660.
- [4] Chinchillas M J, Rosas-casare Z, Arredondo-rea S P, et al. SEM image analysis in permeable recycled concretes with silica fume. A quantitative comparison of porosity and the ITZ[J]. Materials, 2019, 12(13):2201.
- [5] Golafshani E M, Behnood A. Application of soft computing methods for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2018(176):1163-1176.
- [6] Xiao J Z. Strength of recycled aggregate concrete [M]. Berlin: Springer Tracts in Civil Engineering, 2018.
- [7] Wang Y M, Deng Z H, Xiao J Z, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under compression-shear stress state[J]. Construction and Building Materials, 2021(271):121894.
- [8] Zhang K J, Xiao J Z, Zhang C Z. Time-dependent flexural capacity analysis of recycled aggregate concrete beams [J]. Engineering Structures, 2020, 218:110859.
- [9] Wang Y G, Peter H, Niu H C, et al. A new method to improve the properties of recycled aggregate concrete: composite addition of basalt fiber and Nano-silica[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(236):117602.
- [10] Gao D Y, Zhang L J. Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159:126-136.
- [11] Ricardo C, Mauricio A S, Andre M, et al. Analysis of potential use of fiber reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 218:183-191.
- [12] 周聪,郑泽宇,孔祥清,等.高性能聚丙烯纤维对再生混凝土力学性能的影响[J].科学技术与工程,2021(1):

- 303—309 (ZHOU Cong, ZHENG Zeyu, KONG Xiangqing, et al. Influence of high performance polypropylene fiber on mechanical property of recycled concrete[J]. Science and Technology and Engineering, 2021(1):303—309 (in Chinese))
- [13] 孙呈凯, 金宝宏, 李家俊, 等. PVA 纤维再生混凝土力学性能正交试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(4):1569—1575 (SUN Chengkai, JIN Baohong, LI Jiajun, et al. Research on mechanical properties of PVA fiber recycled concrete by orthogonal experiment[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(4):1569—1575 (in Chinese))
- [14] 银英姿, 仇贝. 聚乙烯醇纤维混凝土力学性能及早期开裂试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2):454—458 (YIN Yingzi, QIU Bei. Experimental study on mechanical properties and early cracking of polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2):454—458 (in Chinese))
- [15] Haider M, Baghdadi A L. Experimental study on sulfate resistance of concrete with recycled aggregate modified with polyvinyl alcohol (PVA)[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 14:e00527.
- [16] 罗素蓉, 林扬兴, 肖建庄. 钢-PVA 混杂纤维高强再生骨料混凝土断裂性能[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12):93—102 (LUO Surong, LIN Yangxing, XIAO Jianzhuang. Fracture behaviors of hybrid steel-PVA fiber reinforced high strength recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12):93—102 (in Chinese))
- [17] 高立, 朱方之, 左工, 等. PVA 纤维再生混凝土配合比设计及抗冻性能试验研究[J]. 建材技术与应用, 2019(4):18—21 (GAO Li, ZHU Fangzhi, ZUO Gong, et al. Mix proportion design and frost resistance test of PVA fiber recycled concrete[J]. Technology and Application of Building Materials, 2019(4):18—21 (in Chinese)).
- [18] Guo Y C, Hang J H, Chen G G, et al. Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures[J]. Journal of Cleaner Production, 2014(72):193—203.
- [19] Carneiro J A, Lima p R, Lrite M B, et al. Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2014(46):65—72.
- [20] Wang C Q, Xiao J Z, Liu W G, et al. Unloading and reloading stress-strain relationship of recycled aggregate concrete reinforced with steel/polypropylene fibers under uniaxial low-cycle loadings[J]. Cement and Concrete Composites, 2022(131):104597.
- [21] Senaratne S, Gerace D, Mirzo 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):2318—2327.
- [22] Mansoue G, Arash K, Ali A, et al. Flexural strength enhancement of recycled aggregate concrete beams with steel fibre-reinforced concrete jacket[J]. Engineering Structures, 2021(240):112325.
- [23] Chaboki H R, Ghalehnovi M, Karimipour A, et al. Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2018(186):400—422.
- [24] Weal A, Omar A. Flexural behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018(169):165—178.
- [25] Karimipour A, Ghalehnovi M. Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams[J]. Structures, 2021(29):129—146.
- [26] GB/T 228.1—2010, 金属材料 室温拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011 (GB/T 228.1—2010, Metallic materials-Tensile testing-part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011 (in Chinese))
- [27] 张建伟, 郭旺, 冯曹杰, 等. HRB600 级钢筋纤维高强混凝土梁的受弯性能[J]. 工业建筑, 2020, 50(9):49—54 (ZHANG Jianwei, GUO Wang, FENG Caojie, et al. Flexural behavior of steel fiber reinforced high-strength concrete beams with HRB600 steel bars under monotonic loading[J]. Industrial Construction, 2020, 50(9):49—54 (in Chinese))
- [28] 孙一李全, 赵羽习, 孟涛, 等. 再生砖骨料混凝土柱的小偏心受压性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021(6):1090—1099 (SUN Yiliquan, ZHAO Yuxi, MENG Tao, et al. Small eccentric compression performance of reinforced concrete column made with recycled brick-mixed aggregate [J]. Journal of Zhejiang University

- (Engineering Science), 2021(6):1090–1099 (in Chinese))
- [29] 陈宗平, 梁厚燃. 高温喷水冷却后钢筋再生混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2019, 52(12):22–35 (CHEN Zongping, LIANG Houran. Mechanical behavior test and bearing capacity calculation of reinforced recycled concrete beam subjected to high temperature and subsequent water cooling[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12):22–35 (in Chinese))
- [30] 李响. PVA 纤维混凝土梁抗弯性能研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012 (LI Xiang. Study on flexural behavior of PVA fiber reinforced concrete Beams [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2012 (in Chinese))
- [31] JGJ/T 465–2019, 钢纤维混凝土结构设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019 (JGJ/T 465–2019, Design standard of steel fiber reinforced concrete structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019 (in Chinese))
- [32] GB 50010–2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 (GB 50010–2010, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese))

## Study on flexural behavior of high-strength recycled aggregate concrete beams with polyvinyl alcohol fiber

NIU Haicheng<sup>1</sup>, GAO Jinlong<sup>2</sup>, LI Guoli<sup>3</sup>, SHANG Tianyu<sup>1</sup>, HUANG Minghui<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250000, Shandong, China;

3. Henan XingJian Engineering Consulting Co., Ltd, Pindingshan 467000, Henan, China)

**Abstract:** To study the influence of the polyvinyl alcohol fiber on flexural performance of high-strength recycled concrete beams, the type of concrete and the volume content of polyvinyl alcohol fiber are used as the changing parameters. 5 specimens were completed to bending load test. The development of surface cracks and failure modes of specimens were observed. The load-strain curves and load-maximum crack width curves of the specimens were obtained. The influence of different parameters on its bending performance is analyzed. The experimental results show that the cross-section strain distribution conforms to the assumption of flat section. Compared with ordinary concrete beams, recycled concrete beams have small cracking load, poor bending stiffness and deformation ability. The addition of polyvinyl alcohol fiber inhibits the occurrence and rapid development of cracks, and also significantly improves the cracking load and bending stiffness of recycled concrete beams; in addition, polyvinyl alcohol fiber also enhances the deformation capacity of recycled concrete beams. Compared with recycled aggregate concrete beams without fiber, when 0.2% polyvinyl alcohol fiber was added, the cracking moment, initial stiffness and ductility coefficient are increased by 59.4%, 15.2% and 17.4% respectively. Based on the experimental data, the formula for calculating the maximum crack width of polyvinyl alcohol fiber recycled concrete beams is put forward. The calculation results show that the calculated values are in good agreement with the measured values.

**Keywords:** polyvinyl alcohol fiber; recycled concrete beam; cracking moment; ductility; flexural performance