[文章编号] 1003－4684(2025)02-0078-07

基于圆板法的 HFRC 弯曲韧性试验研究

夏冬桃[1]，Raphan Ombomi[1]，何国章[1,2]，任康宁[1]

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068；
2 湖北联投集团有限公司 湖北工建科技产业投资有限公司，湖北 武汉 430076)

[摘 要] 为研究纤维对钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土弯曲韧性的影响，设计 7 组共 21 个圆板试件进行基于圆板法的弯曲韧性试验，分析再生粗骨料和混杂纤维对 HFRC 破坏形态以及钢纤维掺量、钢纤维种类、聚丙烯纤维分别对 HFRC 弯曲韧性和峰后塑性变形能力的影响。结果表明：50％再生粗骨料取代率的再生混凝土受弯破坏形态与普通混凝土较为相似，均为脆性破坏，但再生粗骨料的取代导致试件初裂后的破坏更迅速，而 HFRC 均为延性破坏；随着钢纤维掺量的增加，HFRC 的弯曲韧性和抗弯承载能力均有所提高；掺有超短微丝钢纤维 SF1 的 HFRC 的弯曲韧性与裂缝控制水平相较于掺多锚点钢纤维 SF2 的 HFRC 更佳；当钢纤维 SF1 的掺量为 1.2％、聚丙烯纤维 PPF 的掺量为 0.11％时，HFRC 的弯曲性能最佳。

[关键词] 钢-聚丙烯混杂纤维；再生混凝土；弯曲韧性；圆板法；能量吸收值

[中图分类号] TU528.572 [文献标识码] A

半个世纪以来，再生混凝土因其绿色、环保、契合国家可持续发展战略等优势被广泛应用于桥梁道路、房屋建筑、基础工程等土木工程领域[1-3]。然而，再生混凝土抗拉强度低、韧性和延性差，改良再生混凝土性能的研究表明，掺加钢纤维材料形成钢纤维再生混凝土是一种有效途径。但再生混凝土作为一种多层次、多组分的非均质混合材料，单一钢纤维的增强和增韧水平有限。若于再生混凝土中混合加入适量的高弹模钢纤维与低弹模聚丙烯纤维配制成钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土(Hybrid fiber recycled concrete，简称 HFRC)，两种纤维能在结构的不同层次与受荷的不同阶段，互相激励补充从而产生“1＋1＞2”的纤维混杂叠加效应[4]，可显著改良单掺钢纤维再生混凝土的弯曲性能并提高其裂后变形性能。

当前，国内外学者对混杂纤维混凝土弯曲韧性开展了系列研究，取得了重要研究成果。已有相关研究主要考虑了钢纤维掺量、聚丙烯纤维掺量、纤维混杂方式、纤维布置方式以及硫酸盐干湿循环作用等因素对弯曲韧性的影响[4-10]。与此同时，孔祥清等[11]通过 16 组纤维再生混凝土梁式试件进行四点弯曲韧性试验，研究了不同掺入方式以及纤维掺量的钢-聚丙烯混杂纤维对再生混凝土小梁弯曲韧性的作用规律；苏骏等[12]通过 18 组纤维再生混凝土棱柱体试件进行四点弯曲试验，研究了不同再生粗骨料取代率和两种不同纤维的掺量对钢－PVA 混杂纤维再生混凝土梁抗弯性能的影响。以上研究主要是采用梁式试件对混杂纤维再生混凝土进行弯曲韧性试验研究，但 HFRC 在实际工程应用中往往以板类构件存在形式较多，梁式试件与工程中再生混凝土的受弯机理存在较大差异，其试验结果离散性相对较大且不能说明混杂纤维的三维增韧效果。故相较于采用梁式试件的梁法，《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13：2009)[13]中的圆板法更能客观、真实地反映 HFRC 的弯曲韧性。

鉴于此，本文开展基于圆板法的 HFRC 弯曲韧性试验，分析钢纤维体积掺量、钢纤维种类和聚丙烯纤维三因素分别对 HFRC 抗压强度和弯曲韧性的作用规律，基于荷载-挠度曲线讨论 HFRC 的增韧与阻裂机理，并结合试件的破坏形态以及能量-挠度曲线给出 HFRC 弯曲韧性的最佳纤维掺量。

1 试验概况

1.1 试验材料和配合比设计

水泥：标号为 42.5 的华新牌普通硅酸盐水泥；细骨料：中粗河砂，细度模数为 2.8；天然粗骨料：5～16.5 mm 的连续级配碎石；再生粗骨料：武汉市城中村某拆迁小区废弃混凝土块经人工初破碎、机器再

[收稿日期] 2023－01－11
[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(51108164)
[第一作者] 夏冬桃(1975－)，女，湖北蕲春人，湖北工业大学教授，研究方向纤维混凝土材料与结构、工程结构检测与加固等。

破碎以及人工筛分而得来，粒径和级配同天然粗骨料；矿粉：S95 级高炉矿渣粉；减水剂：20%减水率的聚羧酸高性能减水剂；水：普通自来水；纤维：超短微丝钢纤维、多锚点钢纤维以及美国希尔公司生产的“杜拉”牌聚丙烯纤维；配置 C50 混凝土，基准配合比见表 1，纤维参数见表 2。设计 7 种不同纤维混合形式，并制作 1 组普通混凝土和 6 组 50%再生粗骨料取代率的再生混凝土圆板试件和立方体试件，各组纤维体积掺量见表 3。

表 1　基准配合比(kg/m³)

种类	水泥	砂子	粗骨料		高炉矿渣粉	水	附加水	减水剂
			天然骨料	再生骨料				
普通混凝土	456	712.8	915.6	—	96.2	220	4.95	5.52
再生混凝土	456	712.8	457.8	457.8	96.2	220	15.25	5.52

表 2　纤维参数

纤维种类	数量/根	抗拉强度/MPa	长度/mm	直径/mm
超短微丝钢纤维(SF1)	85000	2000	13	0.20
多锚点钢纤维(SF2)	19800	1000	30	0.50
聚丙烯纤维(PPF)	3.3×10^7	276	12	0.03

表 3　各组纤维体积掺量　%

试件组	SF1 体积掺量	SF2 体积掺量	PPF 体积掺量
SN1	0	0	0
SR2	0	0	0
SR3	0	0.8	0.11
SR4	1.2	0	0
SR5	0.8	0	0.11
SR6	1.2	0	0.11
SR7	0	1.2	0.11

1.2　再生混凝土搅拌工艺及试件养护

本试验所采用再生混凝土搅拌工艺为两阶段搅拌工艺(two stage mixing approach，TSMA)[14]。采用 100L 双卧强制式搅拌机，首先将再生粗骨料倒入搅拌机中预拌 1 min，再加入天然粗骨料和砂子继续搅拌 2 min；然后加入总用水量一半的水继续搅拌 3 min；再加入水泥和高炉矿渣粉继续搅拌3 min；之后边搅拌混合料边均匀向搅拌机中先后撒入钢纤维和用手预先搓开的聚丙烯纤维继续搅拌6 min，使纤维与各基体材料充分混合均匀；最后，将减水剂和剩余水先后倒入搅拌机中，继续搅拌 3 min 即可。经上述搅拌过程制备的混杂纤维再生混凝土混合料和易性和流动性良好，且无纤维成团现象出现。试件浇筑完成 24 h 后即可脱模，将脱完模的圆板试件和立方体试件及时放入帆布水池中，对其进行现场浸水养护 28 d，试件养护见图 1。

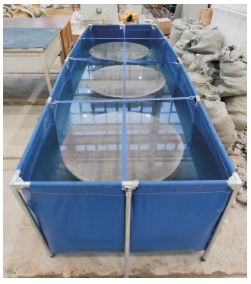
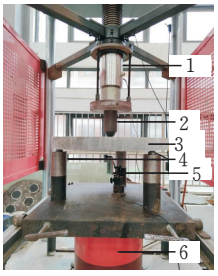


图 1　圆板试件浸水养护

1.3　立方体抗压和弯曲韧性试验方法

试验依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS13：2009)[13]和《混凝土物理力学试验方法标准》(GB/T 50081－2019)[15]，立方体抗压试验采用的试件为边长 100 mm 的立方体，每组 3 个；加载设备选用 200 吨数显式压力试验机，加载方式采用应力控制，加载速率为 0.05 MPa/s。试验结束后读取试验机上的峰值荷载并计算抗压强度，立方体抗压强度尺寸折减系数取 0.9。

弯曲韧性圆板法试验采用直径 800 mm、厚度 75 mm 的圆板试件，每组亦为 3 个；加载设备选用济南恒瑞金公司生产的 300 吨电液伺服液压试验机。在《纤维混凝土试验方法标准》(CECS：2009)[13]中圆板法的基础上，改进试验加载支座，使整个试验传力途径更为明确，能够保证破坏裂缝基本都出现在两相邻支座与板中心连线的角平分线附近，并且使试验前后圆板试件的取放更为便捷，改进后的试验加载装置见图 2。



1－荷载传感器；2－加载头；3－圆板试件；4－球铰支座；5－位移传感器；6－油缸。

图 2　改进后的试验加载装置

正式加载前，让加载头与圆板试件上表面中心接触，此时控制加载头处荷载在 0.2 kN 以内。为了消除试验机油缸与承台之间的竖向变形误差以及承台与三个圆柱体球铰支座间的横向变形误差，试验

分两阶段控制，均为等速位移加载。在圆板试件负荷达到 1 kN 之前，采用 1 mm/min 的速率加载；负荷达到 1 kN 之后，采用 3 mm/min 的速率加载，直至其中心挠度达到 45 mm，试验结束。试验后依据荷载、位移两传感器采集到的数据，作出各试件组的荷载–挠度曲线，在此基础上进行试验结果讨论与分析。

2 纤维对再生混凝土抗压强度的影响

立方体抗压强度值见表 4。由表 4 可知，相比较于普通混凝土试件 SN1，50%再生粗骨料取代率的再生混凝土试件 SR2 的抗压强度有所降低，降幅为 4.60%；掺有纤维的再生混凝土试件 SR3～SR7 相较于未掺纤维的对照组试件 SR2，抗压强度有不同程度的提高，最大增幅为 17.76%；相较于掺 SF2 的 HFRC，掺 SF1 的 HFRC 的抗压强度提高了 7%～9%；另外，PPF 的掺入对 HFRC 抗压强度的影响是极其微弱的，虽然使其抗压强度下降，但降幅只有 1.50%。

表 4 各组立方体抗压强度值 MPa

试件组	抗压强度 f_{cu}	试件组	抗压强度 f_{cu}
SN1	56.54	SR5	59.23
SR2	53.94	SR6	62.57
SR3	55.24	SR7	57.16
SR4	63.52		

3 再生混凝土板弯曲韧性

3.1 受弯破坏过程及破坏形态

3.1.1 未掺纤维普通混凝土板 随着试验加载的进行，当未掺纤维的普通混凝土试件 SN1 中心挠度达到 1.2 mm 左右时，板底同时出现 3 条细微裂缝，迅速由中心向边缘扩展，数秒后板底裂缝迅速扩展至板顶，随着“砰”的一声巨响，圆板裂成 3 块并砸向底部试验机承台。未掺纤维的普通混凝土试件 SN1 的破坏断裂面十分平整，几乎成“一”字形，破坏呈现出脆性破坏特征，破坏形态见图 3。

3.1.2 未掺纤维再生混凝土板 未掺纤维的再生混凝土试件 SR2 的破坏过程同普通混凝土试件 SN1 较为相似，不同的是，板底刚出现 3 条细微裂缝，圆板立马裂成 3 块并砸向底部试验机承台。未掺纤维再生混凝土试件 SR2 的裂缝扩展速度比普通混凝土板 SN1 快很多，其破坏断裂面同样十分平整，亦呈现脆性破坏特征，破坏形态见图 3。由此可知，50%再生粗骨料的取代增加了未掺纤维再生混凝土试件强度低、内部孔隙率大等初始缺陷，加剧了其脆性破坏过程，使其呈现出比试件 SN1 更为明显的脆性破坏特征。

3.1.3 混杂纤维再生混凝土板 对 HFRC 试件 SR5 进行弯曲韧性圆板法试验，当试件中心挠度达到 1.6 mm 左右时，试件底部几乎同时出现 3 条细微的初裂裂缝，且均位于相邻两球铰支座与试件中心点连线的角平分线附近；随着试件 SR5 中心挠度的增加，试件底部裂缝宽度逐渐增大，裂缝由底部逐渐扩展至试件侧边，在此期间，可以看到裂缝断面处钢纤维被拉直、拔出，聚丙烯纤维被拉长、拉断，细小的再生混凝土碎渣掉落到试验机承台上；当试件 SR5 中心挠度达到 30 mm 时，裂缝扩展至试件顶部；直至试验结束，圆板试件 SR5 中心向下凹曲、边部向上翘曲，但并未完全断裂，仍然是一个整体(图 3)，表现出良好的延性。依据纤维间距理论，不难发现正是由于纤维跨越裂缝两侧，很好地起到了桥接作用，纤维与再生混凝土间的粘结应力缓解了裂缝的扩展以及裂缝尖端应力集中现象，延长了试件破坏的时间。

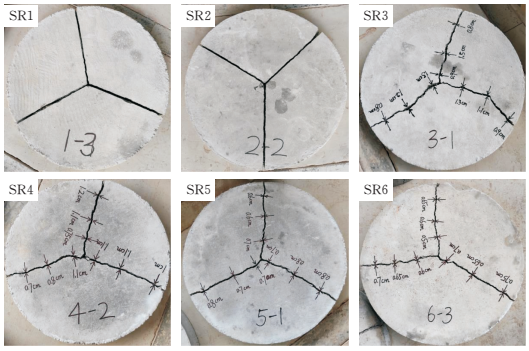


图 3 不同试件组混凝土板破坏形态比较

HFRC 试件 SR3 相对于 HFRC 试件 SR5，裂缝发展速度更快，当中心挠度达到 19 mm 时，试件底部裂缝开始扩展至顶部。试件 SR3 的弯曲破坏过程及形态与试件 SR5 较为相似，破坏形态见图 3。试验结束后测量 HFRC 试件 SR5 和 HFRC 试件 SR3 的裂缝宽度，沿 3 条径向裂缝测量 9 个不同裂缝处，取均值后对比二者的裂缝宽度值，可知试件 SR5 的裂缝宽度均值相较于试件 SR3 缩小了 24.49%。因此，HFRC 试件 SR5 的裂缝控制能力优于 HFRC 试件 SR3。

表 5 为不同试件组纤维再生混凝土板裂缝宽度值表，结合图 3 和表 5 可知，HFRC 试件 SR3、SR5、SR6 的破坏形态大致相同，皆呈现延性破坏特征；单掺超短微丝钢纤维的再生混凝土试件 SR4 由于钢纤维的桥接作用，亦呈现延性破坏特征。所不同的是，不同纤维体积掺量和混杂方式的试件组表现出的裂缝控制能力不同，其裂缝控制能力排序为 SR6＞SR7＞SR5＞SR4＞SR3。

表 5　不同试件组纤维再生混凝土板裂缝宽度

试件组	裂缝宽度值 $x_i(i=1,2,3)$/cm			裂缝宽度算数平均值 X/cm
	试件 1	试件 2	试件 3	
SR3	1.11	0.89	0.95	0.98
SR4	0.73	0.98	0.78	0.83
SR5	0.71	0.76	0.74	0.74
SR6	0.52	0.68	0.64	0.61
SR7	0.68	0.70	0.78	0.72

3.2　荷载–挠度曲线

图 4 给出了再生混凝土试件 SN1，SR2，SR3，SR5～SR7 的荷载–挠度曲线，其中未掺纤维普通混凝土试件 SN1 和未掺纤维再生混凝土试件 SR2 在中心挠度分别达到 1.2 mm 和 1.0 mm 时，达到其各自的初裂荷载，之后两组试件的抗弯承载能力急剧下降，当挠度值分别达到 3.87 mm 和 3.21 mm 时，均发生脆性失稳破坏；而掺入了钢–聚丙烯混杂纤维再生混凝土试件的破坏过程明显延长，大致可分为 3 个阶段，以 HFRC 试件 SR6 为例，阐述混杂纤维再生混凝土板不同阶段的受弯状态与纤维增韧机理。

1）弹塑性阶段：加载初期，当 HFRC 试件 SR6 中心挠度较小时，如图 4 中 OA 段，由于试件变形较小，基体中的微裂缝基本没有扩展再生混凝土基体与混杂纤维二者变形协调，HFRC 试件 SR6 的荷载–挠度曲线与未掺纤维的对照组 SR2 基本重合。此阶段 HFRC 的弯曲性能没有太大区别，纤维对再生混凝土试件的抗弯性能没有明显作用。

2）裂缝出现及扩展阶段：随着 HFRC 试件 SR6 受荷持续增大，当试件底部再生混凝土达到其初裂拉应变时，试件底部开始出现细微裂缝。此时横跨裂缝两端的钢纤维通过桥接作用可以分担部分负荷，微裂缝附近的聚丙烯纤维可以抑制裂缝尖端应力集中现象的产生，限制裂缝进一步发展，使得试件开裂后，负荷没有立即减小，反而随着挠度的增加进一步增大，直至达到抗弯峰值荷载（图 4AB 段），该阶段 HFRC 具有显著的应变硬化特征。

3）裂缝稳定扩展及破坏阶段：HFRC 试件 SR6 在达到抗弯峰值荷载后，不会像未掺纤维的对照组 SR2 一样初裂后立即发生脆性失稳破坏，而是靠着裂缝横断面上钢–聚丙烯混杂纤维的桥联作用继续负荷（图 4BC 段）。随着 HFRC 试件 SR6 受荷进一步增加，纤维与试件基体间逐渐脱黏，部分钢纤维和聚丙烯纤维被拉直、拔出或拉断，试件的抗弯荷载值也在逐渐减小。此过程发生较为缓慢，直至挠度达到 45 mm，试件仍能承受一定的残余荷载，可见，混杂纤维的加入明显改善了再生混凝土的抗弯性能和峰后变形能力。

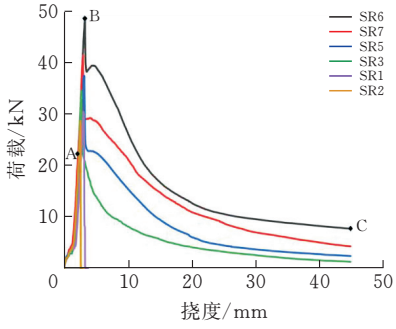
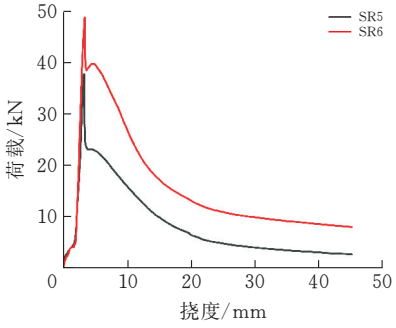


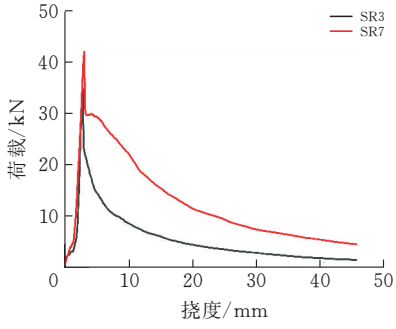
图 4　再生混凝土试件 SN1，SR2，SR3，SR5～SR7 的荷载–挠度曲线

3.2.1　钢纤维体积掺量对再生混凝土板弯曲韧性的影响

从图 5 可以看出，不同钢纤维掺量 HFRC 试件的抗弯极限荷载和荷载–挠度曲线峰后段均有较大差别。钢纤维掺量从0.8%增加到1.2%，即 HFRC 试件 SR6 相对于 HFRC 试件 SR5、HFRC 试件 SR7 相对于 HFRC 试件 SR3，抗弯极限荷载分别增加了 29.19%和 19.63%，初裂挠度提高了 20.15%和 29.82%。钢纤维掺量越高，HFRC 试件的荷载–挠度曲线峰后段更为饱满，表现出更好的弯曲韧性。这是因为随着钢纤维掺量的增加，纤维之间间距减小，破坏界面上横跨裂缝两端的钢纤维数量越多，其传递应力的能力越强，进而减缓裂缝的扩展速度。随着钢纤维掺量的增加，混杂纤维再生混凝土板的抗弯承载能力和弯曲韧性均有所提高。



（a）HFRC 试件 SR5 与 SR6 荷载–挠度曲线



（b）HFRC 试件 SR3 与 SR7 荷载–挠度曲线

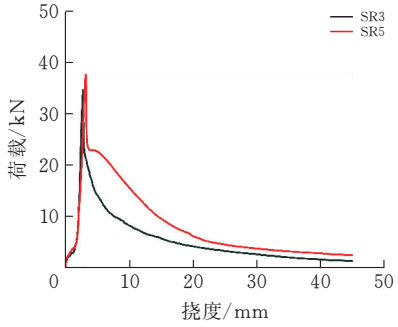
图 5　HFRC 试件 SR5 与 SR6、SR3 与 SR7 荷载–挠度曲线对比

3.2.2　钢纤维种类对再生混凝土板弯曲韧性的影响

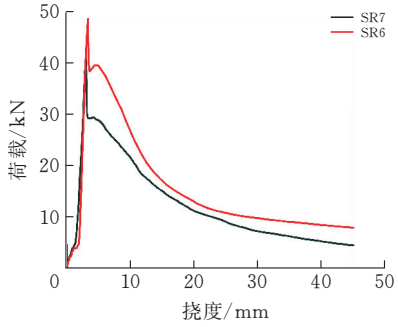
当钢纤维掺量一定时，掺有两种不同钢纤维的

HFRC 的弯曲性能也存在差异。当钢纤维掺量为 0.8%时，相较于 HFRC 试件 SR3，HFRC 试件 SR5 的抗弯极限荷载增加了 8.45%，并且其荷载–挠度曲线峰后段更为饱满、下降得更为缓慢(图 6)；当钢纤维掺量为 1.2%时，相较于 HFRC 试件 SR7，HFRC 试件 SR6 的抗弯极限荷载增加了 17.11%。并且由表 5 可知，HFRC 试件 SR5 的裂缝宽度相较于 HFRC 试件 SR3 缩小了 24.49%，HFRC 试件 SR6 的裂缝宽度相较于 HFRC 试件 SR7 缩小了 15.28%。由此可知，超短微丝钢纤维的增强、增韧以及约束再生混凝土塑性变形的能力明显优于多锚点钢纤维。

对比分析钢纤维 SF1 和 SF2 可知，两种不同纤维混凝土板抗弯性能差异的主要原因是：1)就抗拉强度而言，超短微丝钢纤维 SF1 是多锚点钢纤维 SF2 的两倍，其对再生混凝土基体的增强作用更为优越；2)钢纤维 SF1 的直径不到 SF2 的一半，所以当纤维体积掺量相同时，SF1 的纤维根数为 SF2 的 4 倍多，因此钢纤维间的间距极大缩小，其于基体裂缝断面的桥接能力也极大增强，从而其增韧、阻裂作用也随之增强；3)超短微丝钢纤维 SF1 属于超短型钢纤维，相较于 SF2，其具有更为钝化的边壁效应，于再生混凝土基体中的分散性更好，进而有效限制平行于界面微裂缝的产生与扩展[16]。



(a)HFRC 试件 SR3 与 SR5 荷载–挠度曲线



(b)HFRC 试件 SR7 与 SR6 荷载–挠度曲线

图 6 HFRC 试件 SR3 与 SR5、SR7 与 SR6 荷载–挠度曲线对比

3.2.3 聚丙烯纤维对再生混凝土板弯曲韧性的影响

单掺钢纤维 SF1 的试件 SR4 和 HFRC 试件 SR6 的荷载–挠度曲线如图 7 所示。由图 7 可知，相较于试件 SR4，HFRC 试件 SR6 的抗弯极限荷载增加了 4.18%，初裂挠度增加了 9.52%，残余承载力增加了 43.30%，其荷载–挠度曲线的峰后段更为平滑、饱满，呈现出的裂后弯曲韧性更佳。这是因为聚丙烯纤维(PPF)直径小，掺入再生混凝土中的纤维根数巨多，数量巨大的 PPF 分散于基体的各个位置，能够填补试件内的空隙，提高其密实度；PPF 的伸长率较大，其在抵抗裂缝扩展的过程中伸长变形做功，吸收大量能量，可以缓解裂缝扩展速率及尖端应力集中现象[17]；此外，经表面粗糙工艺处理后，PPF 与基体间的粘结力更强，在部分钢纤维退出工作时，PPF 仍能继续发挥桥联作用，限制微裂缝的产生及扩展，提高再生混凝土的弯曲韧性和抗裂能力。综上所述可知，高弹模的钢纤维能提高再生混凝土的抗弯极限承载力，低弹模的聚丙烯纤维能提高再生混凝土的裂后韧性和塑性阻裂能力，二者叠加后的正混杂效应能明显改良基体的弯曲性能。所以相较于单掺 SF1 的试件 SR4，添加了小掺量 PPF 的 HFRC 试件 SR6 的弯曲韧性更佳。

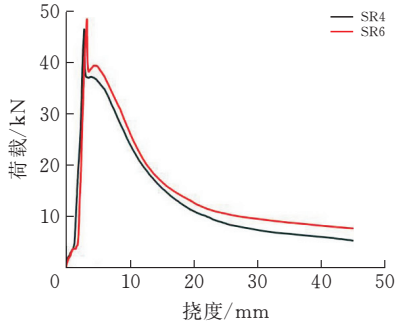


图 7 HFRC 试件 SR4 与 SR6 荷载–挠度曲线对比

3.3 能量–挠度曲线

采用公式(1)对荷载–挠度曲线进行积分，并通过公式(2)[13]对得到的能量吸收值进行修正，图 8 为经修正处理后的能量–挠度曲线。

$$\omega_o = \int_0^{\delta} F \mathrm{d}\delta \tag{1}$$

$$\omega = \omega_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\beta} \left(\frac{d_0}{d}\right) \tag{2}$$

其中：$\beta = 2.0 - (\delta - 0.5)/80$；$\omega$ 为修正后的吸收能量，J；ω_0 为积分得到的吸收能量，J；F 为板的荷载测量值，kN；δ 为板中心挠度测量值，mm；t 和 d 分别为板的平均厚度和平均直径，mm；t_0 和 d_0 分别为板的公称厚度和公称直径，mm。

由图 8 可知，未掺纤维的普通混凝土试件 SN1 和再生混凝土试件 SR2 由于加载初期就发生了脆性失稳破坏，其能量吸收修正平均值分别仅为 31J 和 22J；而掺入了单一钢纤维试件 SR4 或者钢–聚丙

烯混杂纤维 HFRC 试件的能量吸收值相较于对照组试件 SR2 均有不同程度的增加。各组试件在不同挠度时的能量吸收修正平均值见表 6 所示。掺入了不同纤维种类与掺量的再生混凝土试件 SR3～SR7 在达到试验终止条件时，其能量吸收值分别是未掺纤维对照组试件 SR2 的 11.09 倍、28.64 倍、16.91倍、31.82 倍、25.27 倍。

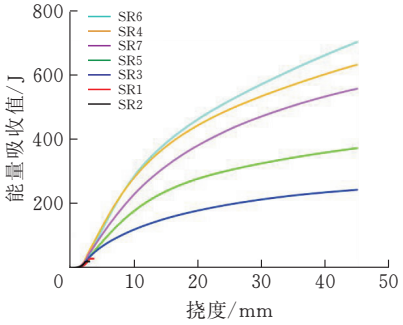


图 8　能量–挠度曲线

表 6　各试件组能量吸收修正平均值　　mm

试件组	不同挠度时的能量吸收修正平均值/J				
	5	10	20	40	45
SN1	31(3.87)	—	—	—	—
SR2	22(3.21)	—	—	—	—
SR3	66	119	179	236	244
SR4	122	277	441	601	630
SR5	78	175	277	358	372
SR6	113	280	460	660	700
SR7	99	225	379	532	556

结合图 8 和表 6，比较钢纤维体积掺量不同的两组 HFRC 试件可知，相比于 SR3，当中心挠度分别为 5、10、20、40、45 mm 时，试件 SR7 的能量吸收修正平均值分别增长了 50.0%、89.1%、111.7%、125.4%和 127.9%。因此，随着钢纤维掺量的增加，HFRC 的吸能耗能水平也随之提升，并且不同钢纤维掺量的两组 HFRC 试件的能量吸收值随着中心点处挠度的增加而提高；HFRC 试件 SR6 与 HFRC 试件 SR7 相比，由于钢纤维 SF1 相较于 SF2 具有更大的抗拉强度，其增强、阻裂效果更佳，并且试验加载后期的钢纤维 SF2 端钩被拉直，增韧效果变差，因此当中心挠度分别为 10、20、45 mm 时，试件 SR6 的能量吸收值分别增长了 24.4%、21.4%和25.9%。故钢纤维 SF1 的吸能耗能水平明显强于 SF2；与单一钢纤维再生混凝土试件 SR4 相比，在中心挠度值达到 10、20、45 mm 时，HFRC 试件 SR6 的能量吸收修正平均值分别增长了1.1%、4.3%和 11.1%，且随着中心挠度的增加，二者的能量吸收值差距也随之扩大。由此可见，HFRC 的吸能耗能能力因其纤维正混杂效应而更强。

对比分析试件 SR3～SR7 的破坏形态、荷载–挠度曲线以及能量–挠度曲线中的各项韧性评价指标，HFRC 弯曲性能的最佳纤维掺量组合为：掺量 1.2%钢纤维 SF1 与掺量 0.11%聚丙烯纤维 PPF 的混杂。

4　结论

1）50%再生粗骨料取代率的再生混凝土受弯破坏形态与普通混凝土较为相似，均为脆性破坏，再生粗骨料的取代导致混凝土初裂后的破坏更为迅速；HFRC 的受弯破坏形态皆为延性破坏。

2）掺入不同纤维掺量与混杂方式的钢纤维和聚丙烯纤维可在不同程度上改良再生混凝土的抗压性能与弯曲性能，相较于未掺纤维的再生混凝土，抗压强度增长了 2.41%～17.76%，抗弯极限荷载增长了 20.45%～68.75%。

3）当钢纤维掺量一定时，掺有两种不同钢纤维 HFRC 的弯曲性能也存在差异。相较于多锚点钢纤维 SF2，掺有超短微丝钢纤维 SF1 的 HFRC 的弯曲韧性更佳，当纤维掺量分别为 0.8%和 1.2%时，其抗弯极限荷载分别提高了 8.45%和 17.11%，裂缝宽度分别缩小了 24.49%和 15.28%，呈现出更佳的峰后裂缝控制水平。

4）HFRC 试件 SR6 比单一钢纤维再生混凝土试件 SR4 的能量吸收能力更佳，当中心挠度为 45 mm 时，能量吸收修正平均值增长了 11.1%。

5）当超短微丝钢纤维 SF1 的掺量为 1.2%、聚丙烯纤维 PPF 的掺量为 0.11%时，HFRC 的弯曲韧性最佳。

[参　考　文　献]

[1] 肖建庄. 大有可为的再生混凝土[J].科技视界，2022，(09)：1-4.

[2] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material[J]. Construction & Building Materials, 2017, 131: 721-740.

[3] 曹万林，肖建庄，叶涛萍，等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J].建筑结构学报，2020，41(12)：1-16.

[4] 夏冬桃，刘向坤，夏广政，等. 混杂纤维增强高性能混凝土弯曲韧性研究[J].华中科技大学学报：自然科学版，2013，41(06)：108-112.

[5] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报，2016，33(06)：1274-1280.

[6] 周晓洁，刘涛，李长辉. 低掺量三元混杂纤维混凝土弯曲韧性试验研究[J]. 地震工程与工程振动，2017，37(04)：138-145.

[7] 权莉，陶文祥. 混杂钢-聚丙烯纤维混凝土弯曲韧性试

验研究[J]. 混凝土,2011(10):25-27.
[8] 陈景涛,张楠,许巍,等. 层布式混杂纤维混凝土弯曲韧性的试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2005(04):76-78.
[9] YOO D Y, KIM S W, PARK J J. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers[J]. Construction & Building Materials, 2017, 132: 219-229.
[10] 谈亚文,杨哲,李丹,等. 硫酸盐腐蚀对混杂纤维混凝土弯曲韧性的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(08):2756-2762.
[11] 孔祥清,高化东,刚建明,等. 钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土弯曲韧性研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(09):2729-2736.
[12] 苏骏,赵家玉,李磊. 钢-PVA 混杂纤维再生混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2021(06):50-55.
[13] 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.
[14] 成全,LING T C,李波. 再生混凝土多次搅拌工艺综述[J]. 混凝土,2019(07):140-144.
[15] 住房和城乡建设部.JGJ/T 221:2010, 纤维混凝土应用技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[16] 夏冬桃,张严方,张周强,等. 混杂纤维喷射混凝土弯曲韧性圆板法试验研究[J]. 建筑结构,2015,45(12):18-22.
[17] 李艺. 混杂纤维混凝土阻裂增韧及耐久性能[M]. 北京:科学出版社,2012:23-25.

Experimental Study on Flexural Toughness of Hybrid Fiber Recycled Concrete Based on a Circular Plate Method

XIA Dongtao[1], Raphan Ombomi[1], HE Guozhang[1,2], REN Kangning[1]

(1 *School of Civil Engin.,Architecture and Environment,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan* 430068,*China*;
2 *Hubei Industrial Construction Tech. Industry Investment Corporation,*
Hubei United Investment Group Corporation, Wuhan 430068, *China*)

Abstract: To study the effect of fiber on flexural toughness of steel polypropylene hybrid fiber recycled concrete, 7 groups of 21 circular plate specimens were designed for flexural toughness tests based on the circular plate method. The effects of recycled coarse aggregate and hybrid fiber on the damage pattern of HFRC and the effects of steel fiber content, steel fiber type and polypropylene fiber on the bending toughness and deformation properties of HFRC were analyzed. The results show that the damage pattern of the recycled concrete with the replacement rate of 50% recycled coarse aggregate is similar to that of the ordinary concrete, both of which are brittle failure. However, the replacement of the recycled coarse aggregate leads to the rapid damage of the specimens after the initial crack, while the HFRC is ductile failure. The flexural toughness and flexural bearing capacity of HFRC both increase with the increase of steel fiber content. The flexural toughness and crack control ability of HFRC doped with ultra-short microfilament steel fibers are better than those of HFRC doped with multi-anchored steel fibers. When the mixture of 1.2% microfilament steel fiber and 0.11% polypropylene fiber, the recycled concrete shows the best bending performance.

Keywords: steel-polypropylene hybrid fiber; recycled concrete; flexural toughness; round panel test; energy value

[责任编校:裴 琴]