

钢-PVA 纤维混凝土预制连梁抗震性能试验研究

于 婧^{1,2}, 贾会芳¹, 张 辉¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土(Steel-Polyvinyl Alcohol Hybrid Fiber Concrete, 简称 SPHFC)预制连梁的抗震性能, 对 1 个普通混凝土(RC)预制连梁试件和 3 个 SPHFC 预制连梁试件进行低周往复加载试验, 分析预制连梁的破坏过程、破坏形态、滞回性能、刚度及耗能能力等抗震指标, 研究连梁基体材料和截面宽度对其抗震性能的影响, 阐明了 SPHFC 预制连梁的破坏机理。结果表明: RC 预制连梁破坏时混凝土剥落现象严重, 最终表现为剪切型破坏; SPHFC 预制连梁破坏时几乎无混凝土剥落现象, 充分发挥了纤维混凝土多裂缝开展的特点, 最终发生弯剪型破坏; SPHFC 预制连梁的承载力、延性、刚度和耗能能力均远高于 RC 预制连梁; 分别增大 SPHFC 预制连梁基体强度或截面宽度, 连梁承载力提高, 延性和耗能能力略有降低。本文提出的新型 SPHFC 预制连梁各项抗震指标均显著优于普通 RC 预制连梁, 且制作简便, 轻质高强, 便于预制吊装, 可在装配式结构中推广应用。

关键词: 钢-PVA 混杂纤维混凝土(SPHFC); 拟静力试验; 小跨高比预制连梁; 抗震性能

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0057-08

Experimental study on seismic performance of Steel-PVA hybrid fiber reinforced concrete coupling beam

YU Jing^{1,2}, JIA Hui Fang¹, ZHANG Hui¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of Steel-Polyvinyl Alcohol Hybrid Fiber Concrete (SPHFC) precast coupling beams, a low-cycle reciprocating loading test was carried out on one ordinary concrete (RC) precast coupling beam specimen and three SPHFC precast coupling beam specimens to analyze the seismic indicators such as failure process, failure mode, hysteresis performance, stiffness, and energy dissipation capacity of the prefabricated connecting beams. The influence of the matrix material and section width of the connecting beam on its seismic performance was studied, and the failure mechanism of SPHFC prefabricated connecting beams was clarified. The results show that the concrete peeling phenomenon is severe when the RC prefabricated connecting beam is damaged, and ultimately manifests as shear type failure. There is almost no concrete spalling when the prefabricated coupling beam of SPHFC is destroyed, which fully shows the characteristics of multi-crack development of fiber concrete, and finally bending-shear failure occurs. The bearing capacity, ductility, stiffness and energy dissipation capacity of SPHFC coupling beams are much higher than those of RC coupling beam. By increasing the material strength or cross-section width, the bearing capacity of coupling beam is improved, while the ductility and energy dissipation capacity are slightly reduced. The results show that the seismic performance of SPHFC coupling beam is significantly better than that of ordinary RC coupling beam, and the new SPHFC precast coupling beam is simple to manufacture, light in weight and high in strength, which is convenient for prefabrication and hoisting, and can be popularized and applied in assembled structures.

Key words: steel-PVA hybrid fiber reinforced concrete; quasi-static test; coupling beam; seismic performance

目前我国建筑行业处于转型期, 住宅产业化快速发展, 这促使装配式建筑正逐渐成为主导的建筑形式^[1-4]。当前我国的城市住宅主要采用高层混凝土剪力墙结构, 而目前关于装配式剪力墙结

构的整体性能和抗震性能的研究尚不够充分, 已明显阻碍了产业化发展进程。预制连梁作为装配式剪力墙结构中主要的耗能构件, 其抗震指标将显著影响结构整体的抗震性能。因此, 研究制作

收稿日期: 2022-12-19

修回日期: 2023-02-02

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(面上)(2020JM-487); 西部绿色建筑重点实验室自主研究课题(LSZZ202019)

第一作者: 于 婧(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新型建筑材料及混凝土结构抗震的研究。E-mail: yujing1506@163.com

轻质高强的预制连梁具有十分重要的意义。

混杂纤维混凝土是一种可多尺度增强、综合性能更优的高性能复合材料^[5-11]。其卓越的变形能力和较高的损伤容限使其具备成为理想预制连梁基体材料的条件。国内外学者将混杂纤维混凝土应用于柱^[12-13]、梁节点^[14]等。然而,当前对纤维混凝土连梁的研究多集中于单一纤维混凝土连梁,混杂纤维混凝土预制连梁的相关研究成果较少。夏冬桃等^[15]发现适量的钢-聚丙烯纤维对深梁抗弯性能的增强效果比单一纤维更明显。刘胜兵等^[16]提出钢-聚丙烯纤维可提高深梁初始极限抗剪强度,提高幅值分别为 84% 和 35%。陈俊伟等^[17]研究发现,与单一纤维混凝土梁相比,混杂纤维混凝土梁的抗冲击性能更好。本课题组前期研究^[18]发现 PVA 纤维和钢纤维可在不同尺度抑制裂缝发展,最终表现为混合正相关效应,可明显提高混凝土力学性能。

本文主要对 3 个 SPHFC 预制连梁和 1 个 RC 预制连梁试件进行低周往复加载试验研究,深入分析该新型预制连梁的抗震性能。以期为装配式结构的相关研究和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

共设计制作了 4 个小跨高比预制连梁试件,与原型构件的比例为 1:2。其中 1 个 RC 预制连梁 CB-1,3 个 SPHFC 预制连梁 CB-2~CB-4,各试件设计参数见表 1。采用两种配合比的 SPHFC,分别记为 SPHFC1 和 SPHFC2,主要是强度指标不同,具体数值见表 1 所示。各试件配筋形式一致,其中腰筋和纵筋均为 HRB400,箍筋为 HPB300,采用对称配筋,试件尺寸和配筋详图如图 1 所示,纵筋上应变片分布情况如图 2 所示。

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of specimens

编号	梁宽/mm	连梁材料	连梁强度/MPa	
			抗压	抗拉
CB-1	120	RC	39.00	2.39
CB-2	120	SPHFC1	88.90	4.42
CB-3	120	SPHFC2	132.30	5.92
CB-4	150	SPHFC1	88.90	4.42

SPHFC 预制连梁与两侧墙体的连接较为重要,为尽量模拟实际工程,先确定预制连梁埋入墙体长度^[20],两端埋入长度为 250 mm,然后制作 SPHFC 预制连梁,待强度达到要求后将其吊装就位,随后绑扎两端墙体钢筋,支模并用 C40 的

商品混凝土浇筑两端墙肢,待强度达标后拆模,则 SPHFC 预制连梁试件制作完成;RC 预制连梁由 C40 商品混凝土一次性浇筑。

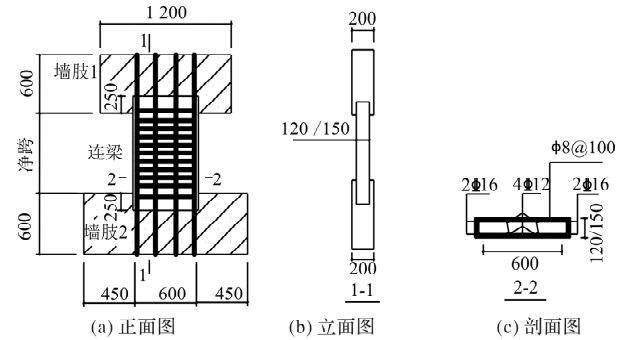


图 1 试件尺寸和配筋

Fig. 1 Specimen size and reinforcement

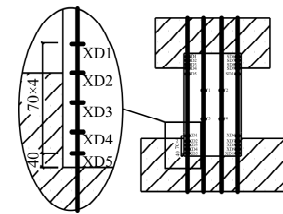


图 2 纵筋应变片(mm)

Fig. 2 Longitudinal reinforcement strain gauge/mm

1.2 材料性能

SPHFC 由水泥、硅灰、粉煤灰、石英砂、端钩型钢纤维、国产 PVA 纤维、聚羧酸高效减水剂和水按一定比例配制而成,配合比见表 2。浇筑试件时,每批连梁试件预留 3 个 150 mm 标准立方体试块和 3 个标准抗拉试块,抗拉试块厚度为 130 mm,截面尺寸如图 3 所示。当试块达到 28 天标准养护龄期后,混凝土强度会继续变化,所以为了测得加载时试件的材料性能,将试块与连梁同条件养护,在试件加载当天测量各试块的强度平均值,见表 1。钢筋力学性能指标见表 3。

表 2 SPHFC 配合比

Tab. 2 Mixture ratio of SPHFC

基体材料	水胶比	砂胶比	钢纤维/%	PVA 纤维/%
SPHFC1	0.35	1.22	1.5	0.1
SPHFC2	0.18	1.12	2.5	0.1

表 3 钢筋力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of materials

钢筋牌号	钢筋直径 d/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa
HPB300	6	420	486
HPB300	8	428	461
HRB400	12	485	650
HRB400	16	465	660
HRB400	20	500	620

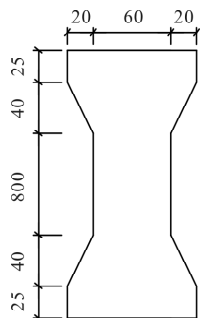


图3 抗拉试块尺寸(mm)

Fig. 3 Tensile test block size/mm

1.3 加载装置和加载制度

(1)加载装置. 采用建研式加载装置, 加载时连梁竖立安装. 为防止试件端部发生转动, 上部设置平行四边形连杆机构; 下端块用压梁及螺杆固定在刚性基座梁上; 为模拟连梁实际受力情况, 将 1 000 kN 液压伺服作动器作用于连梁跨中; 同时, 在 L 形加载梁两侧安装侧向支撑以保证作动器加载点与连梁在同一平面内, 加载装置如图 4 所示;

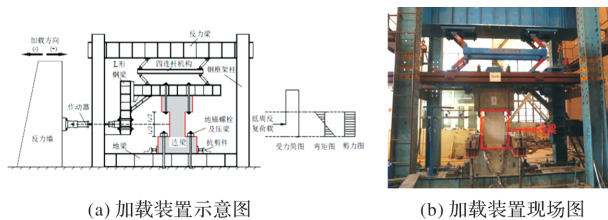


图4 加载装置

Fig. 4 Loading device

(2)加载制度. 为更精准地进行加载控制以及后期试验数据的对比, 采用全位移控制加载, 按照 $\theta = \Delta/l_n = 1/1\ 800$ 、 $1/1\ 200$ 、 $1/900$ 、 $1/600$ 、 $1/500$ 、 $1/400$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/60$ 、 $1/50$ 逐级加载, 其中 Δ 为加载位移, l_n 为连梁净跨. 试件屈服前, 每级加载往复循环 1 次; 当试件荷载-位移曲线出现明显的斜率变化或连梁纵筋达到屈服应变时则认为试件进入屈服状态, 此后, 每级加载往复循环 3 次, 当连梁承载力下降到峰值荷载的 85% 时停止加载, 加载制度如图 5 所示.

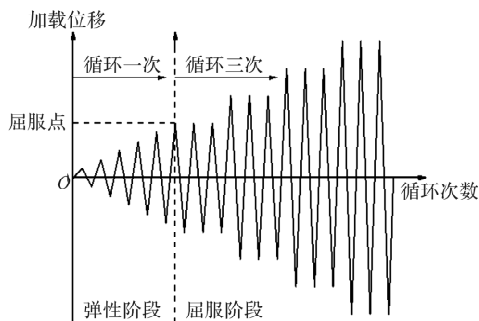


图5 加载制度

Fig. 5 Loading regime

2 试验现象和破坏形态

2.1 试件破坏模式

为便于描述, 规定加载时推为正, 拉为负. 其中布置连梁位移计一侧为北(N)面, 对面为南(S)面, 连梁南(S)面左侧为西侧, 南(S)面右侧为东侧. 各试件的破坏形态和裂缝分布情况如图 6 所示.

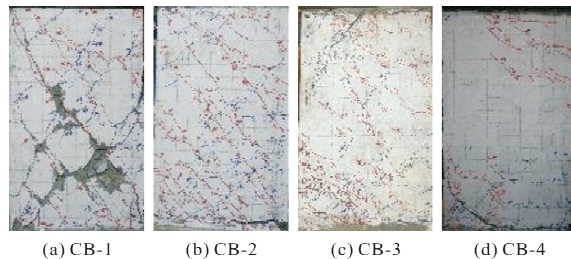


图6 连梁破坏形态

Fig. 6 Failure modes of coupling beam

试件 CB-1 为普通现浇 RC 连梁. 加载至 -0.5 mm 时, 连梁 N 面左下端脚部出现长约 15 cm 的水平细微裂缝; 此后, 随着加载, 在连梁 N 面左侧、S 面右侧不断出现水平裂缝, 裂缝由下端向上端、东侧向西侧延伸发展; 加载至 $+4.5$ mm 时连梁 N、S 两面均出现长约 10 cm 斜裂缝, $+6.0$ mm 时, N、S 两面均出现长约 80 cm 的对角主斜裂缝; 加载至 9 mm 时, 对角斜裂缝延伸扩展, 纵筋屈服, 此后每级加载往复循环 3 次; 加载至 $+18$ mm 时, 连梁承载力达到峰值 264 kN, 主交叉斜裂缝处由混凝土进出, 主斜裂缝扩展至 4.2 mm; 加载至 24 mm 时, 混凝土出现大量剥落, 可以看到内部碎石和钢筋, 透过连梁裂缝可以看到对面, 此外 S 面左侧出现竖向裂缝, 连梁破坏严重已经达到峰值荷载的 85%, 连梁发生明显的剪切型破坏, 连梁破坏形态如图 6(a)所示.

试件 CB-2 为 SPHFC 预制连梁, 连梁材料为 SPHFC1. 加载至 -1.5 mm 时, 连梁 S 面右侧靠近底部出现长约 20 cm 的细微裂缝; 此后, 在连梁根部陆续出现若干条独立的细微水平裂缝; 当加载至 $+9$ mm 时, 连梁 S 面左上角和右下角首次出现斜裂缝, 长度约为 30 cm, 原有右侧水平裂缝继续延伸扩展至连梁中部; 加载至 12 mm 时, S 面出现多条较长的斜裂缝, 且正向加载斜裂缝与负向加载斜裂缝相交; 加载至 15 mm 时纵筋屈服, 斜向裂缝延展发展与连梁原有斜裂缝连结, 出现多条交叉斜裂缝, 此外在加载过程中开始听到“滋滋”声, 钢纤维在裂缝处发挥桥联作用; 加载至 $+24$ mm 时, 连梁达到正向加载达到峰值荷载

380.18 kN, S面右下角出现宽度为2 mm的水平裂缝,长度约为25 cm;继续加载到27 mm,连梁N、S两面底部出现的水平裂缝均贯通,连梁斜裂缝不再继续发展;加载至30 mm,连梁底部水平裂缝宽度可以达到5 mm,随着位移继续增加,底部水平裂缝宽度继续扩展,斜裂缝不再产生直至连梁承载力降低到峰值荷载的85%,试验停止。从裂缝发展特点来看,试件发生弯剪型破坏,破坏形态如图6(b)所示。

试件CB-3为SPHFC预制连梁,连梁材料为SPHFC2。加载至-3 mm时在连梁N面左下角部出现长度约为10 cm长水平裂缝,此时开裂荷载为102.81 kN;加载至+9 mm时,S面右上角出现长度约为18 cm的水平裂缝,至-9 mm时连梁S面右下角出现两条长度约为10 cm的斜裂缝,此时连梁上、下端块与连梁交接面出现竖向裂缝;加载至15 cm时连梁纵筋屈服,在S面四个角部均有新的水平裂缝和斜裂缝产生,S面右上角水平裂缝延伸至连梁上端中部,裂缝宽度约为1 mm;加载至18 mm在连梁四个角部出现更多的斜裂缝与水平裂缝,且在连梁跨中出现主斜裂缝,至18 mm第二级时连梁N、S两面中部均出现对角交叉斜裂缝;加载至21 mm时,连梁正负向均达到峰值荷载,S面右上角水平裂缝宽度达到3 mm;加载至27 mm时S面上部水平裂缝宽度达到1 cm,与左上斜裂缝贯通并延伸至连梁跨中,下端水平裂缝与左下斜裂缝贯通;加载至30 mm连梁承载力下降已超过峰值荷载的85%,试验停止加载。从裂缝发展特点来看,试件发生弯剪型破坏,破坏形态如图6(c)所示。

试件CB-4为SPHFC预制连梁,连梁材料为SPHFC1,连梁截面宽度增加为150 mm。加载至-4.5 mm时,在S面右下侧底部出现长约10 cm的水平裂缝,此时开裂荷载为130 kN;随着继续加载,在连梁底部陆续出现多条水平微细裂缝;加载至15 mm时连梁S面上部出现长约25 cm的水平裂缝,右侧出现多条长约5 cm的水平裂缝,在N面左上角及右下角首次出现多条斜裂缝;加载至18 mm时连梁纵筋屈服,开始每级加载3次循环;当加载至21 mm时,S面左下侧及N面左上侧出现大量长度较短的斜裂缝,此时正向加载达到峰值431.19 kN;随着继续加载,连梁两面跨中一直无新裂缝产生,但连梁S面及N面角部同一位置形成弧形主裂缝延伸至跨中,且裂缝宽度不断增大,至39 mm第3次循环时,弧形主裂缝处纵筋断裂产生巨大声响,试验停止。从裂缝发

展特点来看,试件发生弯剪型破坏,破坏形态如图6(d)所示。

综合分析以上试件破坏模式和试验现象,得到以下特点:

(1)RC预制连梁混凝土剥落现象严重,最终表现为剪切破坏。SPHFC预制连梁在屈服前,出现少量水平微裂缝;屈服后,水平主裂缝周围伴有大量细微裂缝;达到峰值荷载时,微裂缝分布细密,未出现大面积混凝土剥落现象。SPHFC预制连梁最终破坏形态均为弯剪型,表明混杂纤维的掺入会改变预制连梁的破坏形态;

(2)当增大SPHFC预制连梁截面宽度时,试件CB-4裂缝多集中于连梁与上下端块交界处,跨中几乎无明显斜裂缝,这是由于剪压区混凝土面积增大,连梁受剪承载力提高,裂缝发展受到抑制;

(3)总体而言,SPHFC预制连梁均以水平裂缝为主,裂缝窄,长度短,最终表现为弯剪型破坏,表明SPHFC具有良好的应变硬化效应和拉伸性能,不仅可以增强预制连梁的抗震性能,同时可以控制剪切斜裂缝的产生和发展。破坏时,未见大面积混凝土剥落,保证了连梁完整性。

2.2 滞回性能

各试件滞回曲线、骨架曲线,如图7、8所示。对比RC普通连梁和SPHFC预制连梁可以发现,在荷载-位移曲线达到峰值之后SPHFC预制连梁的强度退化较为缓慢,且极限位移和承载力均大于普通连梁;CB-2相较于普通连梁CB-1滞回曲线更为饱满,表明耗能能力较好;材料强度较高的连梁CB-3滞回曲线比CB-2的更加饱满,承载力有一定的提升,但提升的幅度不大;截面宽度增加后的CB-4的承载力有所提升,但是捏缩效应更加明显。

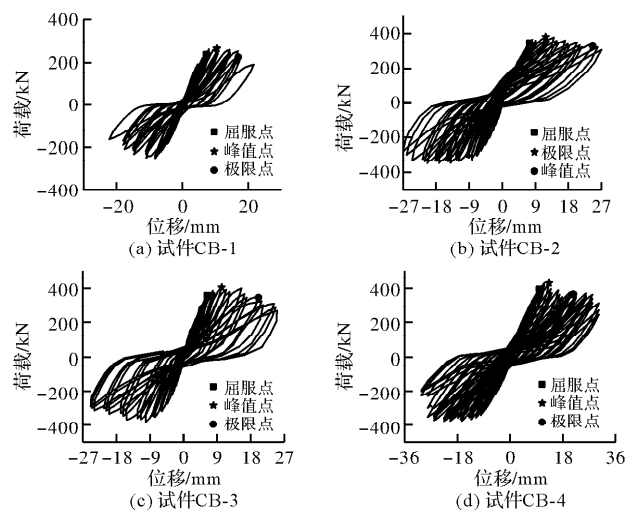


图7 各试件骨架曲线对比

Fig. 7 Comparison of skeleton curves of all specimens

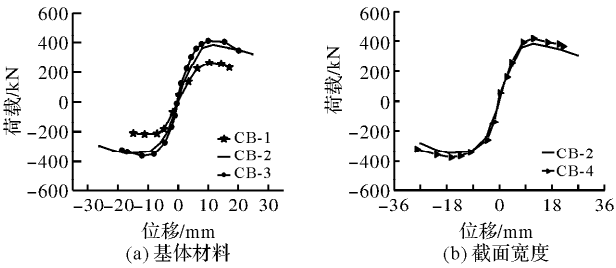


图 8 各试件骨架曲线对比

Fig. 8 Comparison of skeleton curves of all specimens

由图 7 和图 8 可得:

(1)与 RC 预制连梁相比, SPHFC 预制连梁的滞回环圈数明显增多, 滞回曲线更加饱满, 极限荷载和极限位移均显著提高, 且骨架曲线下降段较为平缓, 表明 SPHFC 预制连梁中纤维起到了较好的裂缝抑制作用, 有效提高了连梁韧性;

(2)CB-3 相对于 CB-2, 材料抗压强度提高了 43.4 MPa, 抗拉强度提高了 1.5 MPa, 对连梁初始刚度并没有明显影响, 试件峰值荷载提高 20 kN;

(3)CB-4 相对于 CB-2, 连梁截面宽度由 120 mm 增加为 150 mm, 连梁承载力提高了 40 MPa, 初始刚度并无明显区别, 滞回曲线捏缩更加明显, 可见增加连梁截面宽度对连梁承载力有一定提升作用。

2.3 承载力与延性

各试件的屈服荷载由能量等值法^[22]确定, 极限荷载取峰值荷载的 85%; 延性用位移延性系数 μ 衡量, μ 为极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值。

剪压比可反映连梁相对受剪承载力, 剪压比过大 会使试件延性性能降低, 导致其发生脆性剪切

破坏。规范^[23]规定, 当连梁跨高比不大于 2.5 时, 连梁剪压比应小于 0.15。剪压比计算公式如下。

$$\lambda = \frac{V_u}{f_c b h_0} \quad (1)$$

式中: λ 为剪压比; V_u 为连梁抗剪承载力, kN; f_c 为混凝土轴心抗压强度, MPa。

由表 4 分析可得:

(1)SPHFC 连梁的剪压比均低于普通混凝土连梁 CB-1, 且低于 0.15, 满足规范要求, 体现了 SPHFC 连梁的延性优势;

(2)与 RC 预制连梁 CB-1 相比, SPHFC 预制连梁 CB-2 的峰值荷载和位移延性系数分别提高了 42.06% 和 43.78%, CB-3 提高了 53.66% 和 28.33%。原因一: PVA 纤维在微观上推迟初始裂缝的产生, 钢纤维在宏观上限制已有裂缝的发展, 二者协同作用^[6], 可显著改善预制连梁承载力和延性; 原因二: 混凝土和端钩型钢纤维的黏结力会在预制连梁接近极限承载力时进一步加强^[9], 从而提高预制连梁承载力。随着 SPHFC 强度的提高, 试件 CB-3 的位移延性系数降低了 10.75%。这是由于增加钢纤维掺量, 会劣化纤维的均匀分布情况, 从而影响预制连梁延性;

(3)增大 SPHFC 预制连梁截面宽度, CB-4 极限承载力比 CB-2 提高了 10.91%, 位移延性系数降低了 29.34%。这是因为预制连梁截面宽度的增加提高了混凝土项的抗剪贡献, 然而在纤维掺量不变的情况下, 增大截面宽度会使裂缝处纤维有效应力降低, 控制混凝土裂缝发展的能力减弱, 导致 SPHFC 预制连梁延性下降。

表 4 各试件特征点试验结果

Tab. 4 Test results of characteristic points of each specimen

试件编号	加载方向	屈服点		峰值点		极限点		μ	λ	破坏形态
		位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN			
CB-1	正向	7.19	234.61	10.45	263.55	17.05	224.02	2.37	0.129	剪切破坏
	负向	6.57	212.80	8.27	247.17	14.94	210.10	2.27	0.121	
CB-2	正向	7.50	345.10	11.83	380.18	24.74	323.15	3.30	0.125	弯剪破坏
	负向	7.72	309.60	17.20	345.38	26.18	293.57	3.39	0.056	
CB-3	正向	6.38	357.15	10.19	404.91	20.17	344.18	3.16	0.052	弯剪破坏
	负向	6.59	330.18	10.18	379.86	18.62	322.88	2.83	0.053	
CB-4	正向	0.11	394.92	13.32	429.35	21.72	364.95	2.15	0.078	弯剪破坏
	负向	9.14	321.10	16.51	375.31	28.15	319.05	3.08	0.071	

2.4 刚度退化

采用割线刚度 K_i 表示各试件的刚度退化^[24]。由图 9 可知, 各试件刚度退化曲线规律基本一致, 加载前期, 裂缝不断产生和扩展, 混凝土抗剪能

力被削弱, 刚度退化明显; 加载后期, 混凝土损伤演化完成, 不再有新裂缝产生且已有裂缝不再扩展, 故后期刚度退化不明显。增大 SPHFC 强度, CB-3 的初始刚度明显大于 CB-2, 之后刚度逐

渐接近,表明 SPHFC 强度对预制连梁初始刚度的影响较大;增大 SPHFC 预制连梁截面宽度,CB-4 的初始刚度始终大于 CB-2。

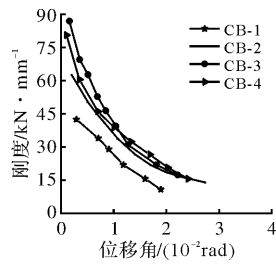


图9 各试件刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation curve

2.5 耗能能力

采用累积耗能表示各预制连梁试件的耗能能力,各试件从开始加载到达到极限荷载时的累积耗能,如图10所示。表5给出了试件在特征点处的累积耗能。

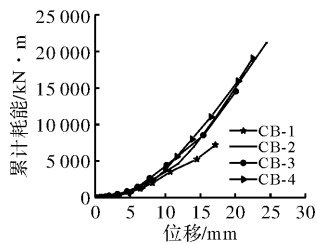


图10 累积滞回耗能-位移曲线

Fig. 10 Cumulative hysteretic energy dissipation-displacement curve

表5 各连梁的累积耗能

Tab. 5 Cumulative energy consumption of each beam

编号	累积耗能 $E_{\text{Sum}}/\text{kN} \cdot \text{m}$		
	屈服点	峰值点	破坏点
CB-1	1 412	2 678	6 359
CB-2	2 160	7 485	21 224
CB-3	1 739	4 419	13 580
CB-4	3 791	9 701	19 076

由图10和表5可知:与RC预制连梁相比,SPHFC预制连梁在极限位移点的累积耗能提高了113.56%~233.76%,混杂纤维混凝土充分发挥了多裂缝开展的特征,形成了良好的耗能体系,显著提高预制连梁抗震性能;提高SPHFC强度,预制连梁耗能能力降低,分析认为增加纤维掺量会使纤维分布不均匀,使其无法充分发挥耗能能力。

3 连梁试件的钢筋应变片

选取典型的应变片XD1进行分析,各试件在

XD1位置处纵筋的应变滞回曲线如图11所示。通过钢筋材性试验,得到纵筋屈服应变为 $2\,348 \times 10^{-6}$,在图11中用水平直线表示。

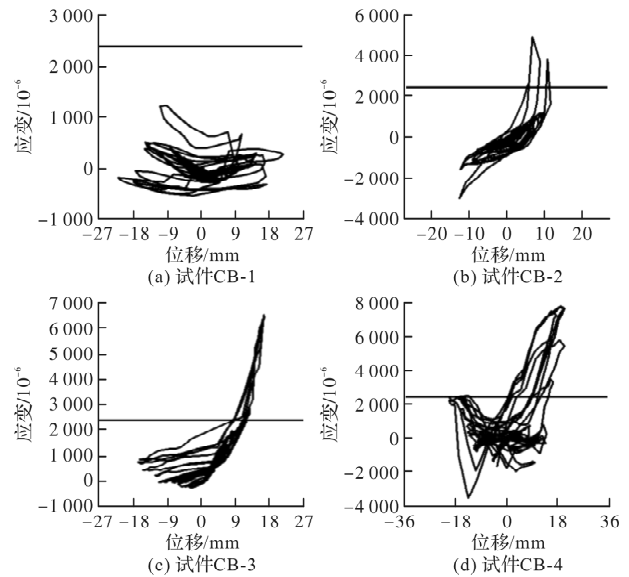


图11 钢筋应变滞回曲线

Fig. 11 Reinforcement strain hysteresis curve

由图11可以看出,SPHFC预制连梁的纵筋应变明显高于RC预制连梁,且均达到屈服,而RC预制连梁底部纵筋并未达到屈服。这是由于混杂纤维的加入使连梁裂缝开展发生变化,导致传力机制改变。SPHFC预制连梁的弯曲破坏程度更加明显,且应变片XD1所在位置是连梁下端与固定端交接处,此处纵筋在弯曲破坏中承担较多的应力。这也表明在混杂纤维混凝土连梁中纵筋性能可以得到充分发挥,纵筋销栓作用增强,应当考虑连梁抗剪承载力中纵筋的抗剪贡献。

4 混杂纤维对连梁的增强机理

相关学者提出了多种抗剪承载力计算模型^[25-26],其中分项叠加思想被广泛采纳,我国现行规范^[23]也体现了这一思想,认为普通混凝土连梁的抗剪作用由混凝土项和箍筋项组成,抗剪承载力计算公式如下。

$$V_u = 0.38f_t b h_0 + 0.9 \frac{A_{sv}}{s} f_{yv} h_0 \quad (2)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度; b 为连梁截面宽度; h_0 为连梁截面有效宽度; A_{sv} 为箍筋间距 s 范围内箍筋各肢的全截面面积; f_{yv} 为箍筋屈服强度。

应用公式(2)得到本文4片预制连梁的抗剪承载力计算值 $V_{u\text{cal}}$,其与试验值 $V_{u\text{test}}$ 的对比结果见表6。

表 6 计算值与试验值对比结果

Tab. 6 Comparison of calculation value and test value

试件编号	$V_{u\text{ test}}/\text{kN}$	$V_{u\text{ cal}}/\text{kN}$	$\frac{V_{u\text{ test}}}{V_{u\text{ cal}}}$
CB-1	255.36	265.74	0.96
BC-2	362.78	271.97	1.33
BC-3	392.39	311.30	1.26
BC-4	408.03	300.94	1.36

由表 6 可知, 普通混凝土连梁抗剪承载力计算值与试验值吻合良好, 而纤维混凝土连梁抗剪承载力试验值远高于计算值, 可从 SPHFC 预制连梁的破坏过程分析这一现象以及混杂纤维对连梁的增强机理。

混杂纤维主要通过其抗拉和增韧作用提高 SPHFC 连梁强度。当连梁未开裂时, 主要由混凝土承担拉力; 连梁出现裂缝后, 裂缝处混凝土退出工作, 桥联于裂缝间的纤维开始发挥其抗拉作用, 早期主要由 PVA 纤维承担拉力, 有效抑制了裂缝的产生; 随着裂缝发展, PVA 纤维被拉断或拔出, 钢纤维逐渐开始发挥作用并进入强化阶段。一方面, 混杂纤维有效分担了分布钢筋的一部分应力; 另一方面通过对纵筋应变分析可得混杂纤维混凝土与钢筋之间有良好的粘结性能, 故二者变形协调能力增强, 从而提高纵筋的销栓作用, 使 SPHFC 连梁承载力提高。纵筋屈服后, 连梁可继续承受荷载; 当连梁达到极限承载力时, 其抗剪承载力比普通混凝土连梁提高了 50% 左右。所以混杂纤维混凝土预制连梁的抗剪承载力除应考虑混凝土项和箍筋项的贡献外, 还应考虑纤维项和纵筋项的贡献。

5 结论

本文提出将性能更加优越的钢-PVA 混杂纤维混凝土应用于小跨高比预制连梁, 通过拟静力试验, 与普通 RC 预制连梁做对比, 得到以下结论:

(1)SPHFC 预制连梁的裂缝发展得到有效控制, 几乎无混凝土剥落现象, 保证了连梁的完整性, 最终发生弯剪型破坏, 破坏程度远小于 RC 预制连梁;

(2)SPHFC 预制连梁的承载力、延性、刚度和耗能能力均远高于 RC 预制连梁, 分别可提高 42.06%、43.78%、97.7%、233.76%, 可见 SPHFC 预制连梁的综合抗震性能显著高于 RC 预制连梁;

(3)提高连梁基体强度, 连梁的承载力提高, 延性降低。依据本文研究结果, 建议钢纤维掺量为 1.5%, PVA 纤维掺量为 0.1%。增大连梁截面宽度, 连梁承载力提高而延性降低, 建议采用合

适的连梁截面尺寸;

(4)混杂纤维混凝土中纤维的桥联作用, 使裂缝的开展模式发生改变, 从而改变传力机制, 纤维和纵筋对连梁的抗剪承载力有明显的促进作用, 因此应同时考虑混凝土, 箍筋, 纵筋和纤维对混杂纤维混凝土连梁的抗剪贡献;

(5)本文提出的 SPHFC 预制连梁制作简单, 可以减少钢筋用量, 抗震性能明显优于 RC 预制连梁, 可以达到轻质高强的效果, 有利于预制吊装, 可为预制装配式结构的相关研究和施工提供参考。

参考文献 References

- [1] 郝际平, 薛强, 黄育琪, 等. 装配式建筑的系统论研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1): 14-20.
HAO Jiping, XUE Qiang, HUANG Yuqi, et al. Research of prefabricated building based system theory[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 14-20.
- [2] 张永鸿, 任双宏, 袁顺利. 国内基于超高性能混凝土(UHPC)的装配式建筑连接应用研究综述[J]. 建筑结构, 2023, 53(增 1): 1200-1205.
ZHANG Yonghong, REN Shuanghong, YUAN Shunli. Domestic based on ultra high performance concrete (UHPC) review of research on connection application of prefabricated buildings[J]. Building Structure, 2023, 53 (S1): 1200-1205.
- [3] 吴刚, 冯德成, 徐照, 等. 装配式混凝土结构体系研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(4): 41-51, 77.
WU Gang, FENG Decheng, XU Zhao, et al. Research developments in precast concrete structural systems[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(4): 41-51, 77.
- [4] 鲁余勇, 冯云, 杨国梁, 等. 全装配式混凝土框架综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6): 96-105, 150.
LU Yuyong, FENG Yun, YANG Guoliang, et al. Summary of wholly precast concrete frame[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(6): 96-105, 150.
- [5] ROSSI P. High performance multimodal fiber reinforced cement composites; the LCPC experience[J]. ACI Materials Journal, 1999, 94(6): 478-483.
- [6] NEMKUMAR Banthia. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices[J]. Materials & Structures, 2004, 37(10): 707-716.
- [7] 姚志雄, 周健. 纤维增强活性粉末混凝土(RPC)断裂能的研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4): 356-360.
YAO Zhixiong, ZHOU Jian. Study on fracture energy of reactive powder concrete reinforced by steel-polypropylene hybrid fiber[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(4): 357-360.
- [8] TENG S, AFROUGHSABET V, OATERTAG C P. Flexural behavior and durability properties of high per-

- formance hybrid-fiber-reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 504-515.
- [9] 郭瑞,李承高,咸贵军. 碳-玻璃纤维混杂复合材料杆体的力学与耐久性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(2): 174-183.
- GUO Rui, LI Chenggao, XIAN Guijun. Study on mechanical and durability of carbon glass fiber hybrid composite rod[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(2): 174-183.
- [10] LI B, CHI Y, XU L, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials 2018, 191: 80-94.
- [11] CHU S H, KWAN AKH. Novel hybrid fiber factor for hybrid fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(10): 04021278.
- [12] 徐礼华,邓方茜,徐浩然,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 3-13.
- XU Lihua, DENG Fangqian, XU Haoran, et al. On seismic behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 3-13.
- [13] ZHANG Bing, ZHAO Junliang, HUANG Tao, et al. Effect of fiber angles on hybrid fiber reinforced polymer concrete-steel double-skin tubular columns under monotonic axial compression[J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(7): 1487-1504.
- [14] PERUMAL P, THANUKUMARI B. Use of fibre cocktails to increase the seismic performance of beam-column joints[J]. International Journal of Engineering Science & Technology, 2010, 2(9): 3997-4006.
- [15] 夏冬桃,徐世烺,夏广政. 钢/聚丙烯混杂纤维对 HPC 深梁受弯性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 313-316.
- XIA Dongtao, XU Shilang, XIA Guangzheng. Effect of hybrid fibers on bending capacity of high-performance concrete deep beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 313-316.
- [16] 刘胜兵,徐礼华. 混杂纤维高性能混凝土深梁受剪性能[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 29-39.
- LIU Shengbing, XU Lihua. Shear behavior of hybrid fiber reinforced high performance concrete deep beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(3): 29-39.
- [17] 陈俊伟,孙文昊,李东升,等. 混杂纤维钢筋混凝土梁承载力试验研究及计算方法[J]. 工业建筑, 2023, 53(增): 117-180.
- CHEN Junwei, SUN Wenhao, LI Dongsheng, et al. Experimental research and calculation method on the bearing capacity of hybrid fiber reinforced concrete beams [J]. Industrial Construction, 2023, 53(S): 117-180.
- [18] 于婧,翟天文,梁兴文,等. 钢-PVA 纤维混凝土流动性及力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 402-407.
- YU Jing, ZHAI Tianwen, LIANG Xingwen, et al. Fluidity and mechanical properties of steel-PVA fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 402-407.
- [19] 梁兴文,邢朋涛,刘贞珍,等. 小跨高比纤维增强混凝土连梁抗震性能试验及受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 48-57.
- LIANG Xingwen, XING Pengtao, LIU Zhenzhen, et al. Experimental study on seismic behavior and shear capacity of FRC coupling beams with small span-to-depth ratio[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 48-57.
- [20] 车佳玲,马彩霞,梁兴文,等. FRC 预制连梁梁端埋入长度计算方法研究[J]. 建筑材料, 2015, 31(11): 29-33.
- CHE Jialing, MA Caixia, LIANG Xingwen, et al. Calculation method research for length of end portion buried in pier of FRC precast coupling beams[J]. Building Science, 2015, 31(11): 29-33.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2015.
- [22] 石伟明. 加固改造梁柱节点的连接方法及抗震性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- SHI Weiming. Beam-column joints in reinforcement and reconstruction of buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. (2015 年版)北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. (2015 edition) Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [24] 克拉夫 R,彭津 J. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 45-52.
- CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 45-52.
- [25] 梁兴文,王照耀,于婧,等. 超高性能混凝土有腹筋梁受剪性能及受剪承载力研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 56-67.
- LIANG Xingwen, WANG Zhaoyao, YU Jing, et al. Study on shear behavior and shear bearing capacity of UHPC beams with stirrups[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 56-67.
- [26] 戚家南,王景全,周凯,等. UHPC 梁受剪性能试与抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 95-103.
- QI Jianan, WANG Jingquan, ZHOU Kai, et al. Experimental and theoretical investigations on shear strength of UHPC beams [J]. China J. Highw. Transp, 2020, 33(7): 95-103.