

钢纤维特性及成型方式对 UHPC 弯曲性能的影响

邓宗才, 王梦新

(北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 为研究钢纤维特性及试件成型方式对超高性能混凝土 (UHPC) 弯曲性能的影响, 本文对该材料进行四点弯曲试验, 设计变化参数分别为钢纤维长径比、体积掺率、形状以及试件成型方式。结果表明: 1) 当钢纤维长径比由 37 提高至 65 时, UHPC 峰值韧性比提高 52.47%, 峰后韧性先降低后提高; 2) UHPC 初裂荷载、峰值荷载和弯曲韧性均随钢纤维掺率的提高而提高; 3) 相比搅拌法成型 UHPC, 渗浆法成型 UHPC 峰值韧性下降 24.32%~35.78%; 4) 与端钩形钢纤维增强 UHPC 相比, 弧形钢纤维增强 UHPC 的峰值荷载和弯曲韧性均下降; 5) 可以从能量比与强度比角度评价 UHPC 在挠曲硬化段和软化段的弯曲韧性。本文成果可为 UHPC 的广泛应用提供一定的借鉴。

关键词: UHPC; 钢纤维; 成型方法; 弯曲韧性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)11-0022-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.11.144

Effect of steel fiber characteristics and molding method on bending properties of UHPC

DENG Zongcai, WANG Mengxin

(Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the influence of steel fiber characteristics and specimen forming method on the bending properties of ultra-high performance concrete (UHPC), a four-point bending test is carried out, and the design parameters are steel fiber length-diameter ratio, volume fraction, shape and specimen forming method. The results show that: 1) The length-diameter ratio of steel fiber is increased from 37 to 65, the peak toughness ratio of UHPC is increased by 52.47%, and the post-peak toughness is decreased first and then increased; 2) The initial crack load, peak load and bending toughness of UHPC all are increased with the increase of steel fiber content; 3) Compared with UHPC by stirring method, the peak toughness of UHPC molded by slurry method is decreased by 24.32%~35.78%; 4) Compared with the end hook steel fiber reinforced UHPC, the peak load and bending toughness of the arc steel fiber reinforced UHPC are decreased; 5) The flexural toughness of UHPC in flexural hardening and softening sections can be evaluated from the perspective of energy ratio and strength ratio. The results can provide some references for the wide application of UHPC.

Key words: UHPC; steel fibers; molding method; bending toughness

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 具有高抗压强度、超高韧性和优良耐久性^[1-2]。但 UHPC 脆性较大, 一般通过掺加钢纤维来延缓 UHPC 裂缝的形成和扩展, 从而提高其韧性^[3]。YOO 等^[4]研究了纤维长度对 UHPC 弯曲

性能的影响, 发现当纤维长度不超过 30 mm 时, 极限弯曲强度随纤维长度增加而增加; 陈聪聪等^[5]研究了养护制度和钢纤维形状对 UHPC 抗折性能的影响, 发现热水养护和蒸汽养护相较于标准养护, 均能显著提升 UHPC 抗折性能, 掺端钩钢纤维 UHPC

收稿日期: 2024-04-15

作者简介: 邓宗才 (1961—), 男, 教授, 从事新型建筑材料与结构的研究。

的抗折强度和韧性指标比起平直形钢纤维 UHPC，均大幅提升；ZHAO 等^[6]采用三点弯曲试验对 UHPC 的弯曲断裂韧性进行研究，发现掺入 1% 钢纤维的 UHPC 的弯曲断裂韧性是不掺入纤维的 UHPC 的 200 多倍；KANG 等^[7]研究了纤维掺量对 UHPC 弯曲断裂性能的影响，发现纤维体积掺量为 0%~5% 时，弯曲强度随纤维掺量的提高而增大；杨松霖等^[8]通过三点弯曲试验研究了端平钢纤维和端弯钢纤维增强 UHPC 的弯曲性能，发现端平纤维增强 UHPC 的弯曲强度和断裂能均优于端弯纤维增强 UHPC。目前关于 UHPC 弯曲性能的研究，一般采用梁的三点弯或者四点弯试验比较平直型或端钩形钢纤维特性对 UHPC 弯曲性能的影响，关于其它异形钢纤维以及试件成型方式的研究较少。因此，本文设计制作 11 组 UHPC 梁，采用四点弯曲试验

研究钢纤维长径比、掺率、形状以及试件成型方式对 UHPC 弯曲性能的影响，以期为 UHPC 在实际工程中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

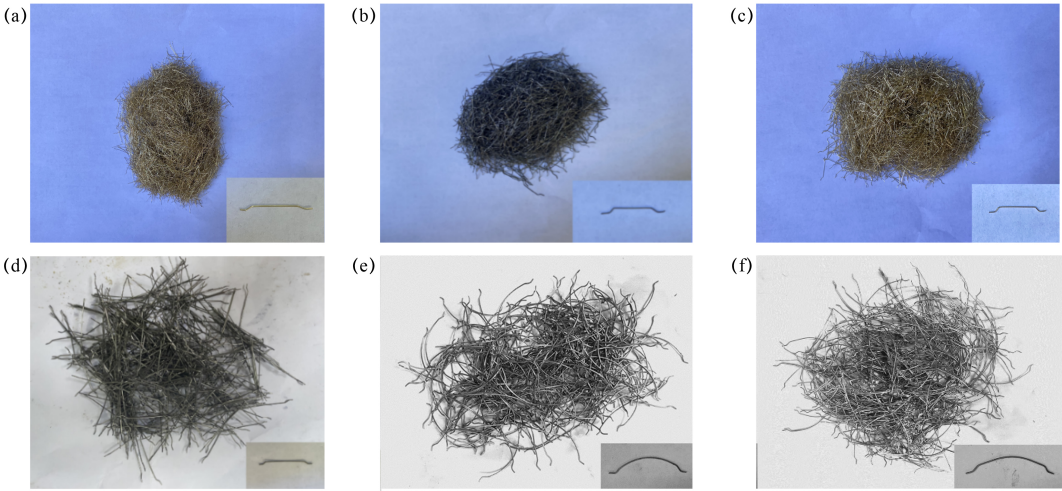
试验选用 52.5 级普通硅酸盐水泥；细骨料采用粒径范围为 0.38 ~ 0.83 mm 和 0.21 ~ 0.38 mm 的河砂；减水剂采用高效聚羧酸减水剂，其表面活性更好，能够在较低的掺量下发挥更大的作用；硅灰采用 Elkem951 级硅微粉；矿粉采用 S95 级粒化高炉矿渣粉；水胶比为 0.195，UHPC 基体配合比如表 1 所示。钢纤维物理力学指标和几何尺寸如表 2 所示，外观如图 1 所示。

表 1 UHPC 基体配合比

水泥	硅灰	矿粉	河砂		水	减水剂
			0.425 ~ 0.850 mm	0.212 ~ 0.425 mm		
650	225	200	425	650	210	4.3

表 2 钢纤维物理力学指标和几何尺寸

形状	编号	长度/mm	直径/mm	弧长/mm	曲率半径/mm	长径比	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
端钩形	H1	13	0.20	—	—	65	2 800	7 800
	H2	20	0.40	—	—	50	1 500	7 800
	H3	13	0.35	—	—	37	2 800	7 800
	H4	35	0.55	—	—	64	1 250	7 800
弧形	C1	35	0.55	30	15	64	1 250	7 800
	C2	35	0.55	30	23	64	1 250	7 800



(a) H1; (b) H2; (c) H3; (d) H4; (e) C1; (f) C2

图 1 钢纤维外观

1.2 试件设计

共制作 11 组不同类型的弯曲梁试件,以钢纤维长径比、体积掺率、形状以及试件成型方式为变量,试件设计参数和编号如表 3 所示。其中:试件编号命名中“F”为四点弯曲;“A”为试件成型方式为搅拌法,“B”为渗浆法;“Hx”和“Cx”为钢纤维型号;末尾数字为钢纤维体积掺率。

表 3 弯曲试件设计参数

试件编号	成型方式	钢纤维型号	掺率/%	长径比
F-0	搅拌法	—	0	—
FA-H1-2	搅拌法	H1	2	65
FA-H2-2	搅拌法	H2	2	50
FA-H3-2	搅拌法	H3	2	37
FA-H1-3	搅拌法	H1	3	65
FA-H1-4	搅拌法	H1	4	65
FA-H4-2	搅拌法	H4	2	64
FA-C1-2	搅拌法	C1	2	64
FA-C2-2	搅拌法	C2	2	64
FB-H1-2	渗浆法	H1	2	65
FB-H1-3	渗浆法	H1	3	65

1.3 试件成型方式

试件的成型方式分为两种:1) 渗浆法,即注浆纤维混凝土(slurry infiltrated fiber concrete, SIFCON)成型方法^[9],先将钢纤维均匀铺入模具内,然后置于振动台,在振动作用下将搅拌好的 UHPC 浆体注入模具;2) 搅拌法,将水泥、硅微粉、矿粉和河砂用强制式搅拌机干拌 3 min,后加入水和减水剂继续搅拌 5 min,再加入钢纤维搅拌均匀后注模。所有试件成型后在室内静置 24 h,脱模后标准养护 28 d。

1.4 加载方案

四点弯曲试验采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体,具体如图 2 所示。试验采用 MTS 电液伺服控制电子万能试验机,采用位移控制,位移控制速率为 0.2 mm/min。为测得试件跨中挠

度,在跨中位置的两侧安装两个精度为 0.001 mm 的线性位移计,试验加载装置如图 3 所示。

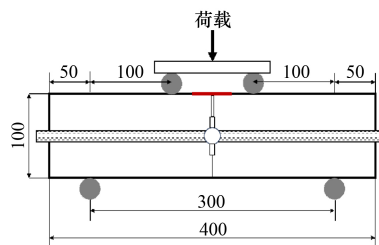


图 2 弯曲加载示意

mm

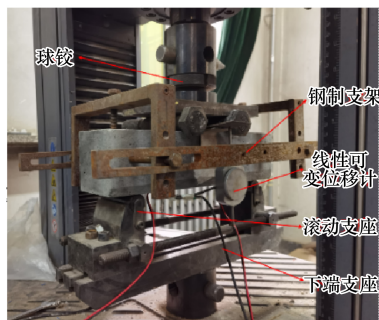


图 3 试验加载装置和仪器布置

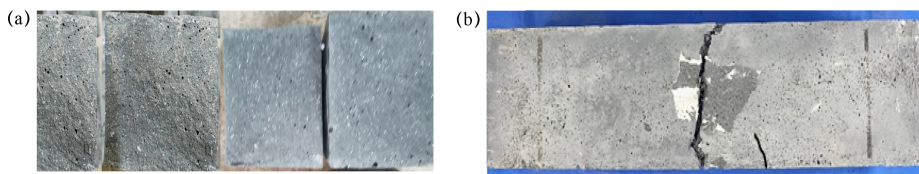
2 试验结果与分析

2.1 弯曲破坏形态

UHPC 四点弯曲梁的典型破坏形态如图 4 所示。无钢纤维 UHPC 梁在荷载达到峰值时突然断裂。钢纤维增强 UHPC 梁产生初始裂缝后,由于钢纤维的桥接作用出现微细裂缝;继续加载,微裂缝长度逐渐增加,数量也有所增多;随后跨中微裂缝开始贯通,形成一条明显的主裂缝,其宽度随着荷载的增大而缓慢增加,主裂缝处的钢纤维被拔出的数量逐渐增加;当钢纤维被拔出到一定程度时,试件承载能力开始明显下降直至最终发生破坏。

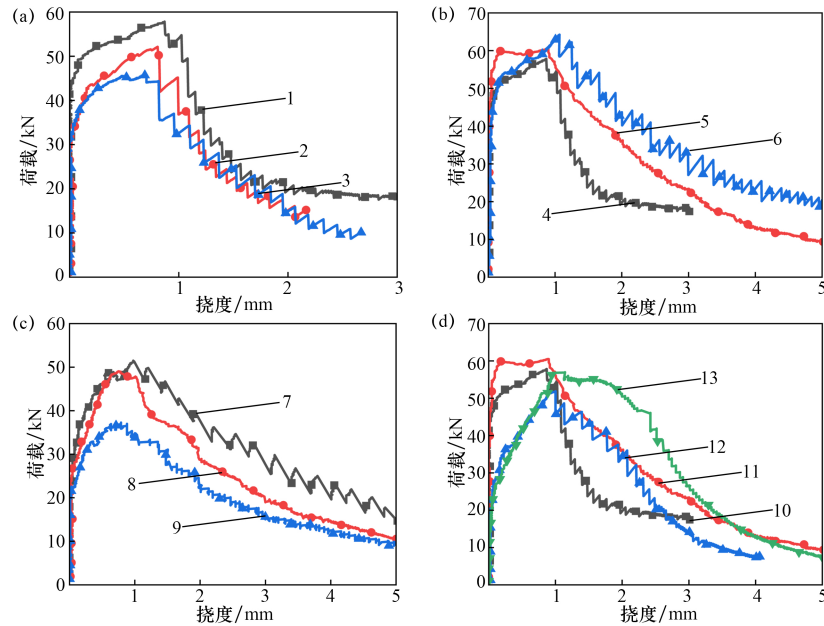
2.2 荷载-挠度曲线

试验实测的荷载-挠度曲线如图 5 所示。由图 5 可知:钢纤维增强 UHPC 梁的荷载-挠度曲线大致可分为 3 个阶段:1) 弹性变形段,曲线近



(a) 无钢纤维 (b) 有钢纤维

图 4 UHPC 四点弯曲梁的典型破坏形态



(a) 长径比; (b) 掺量; (c) 形状; (d) 成型方式

1—FA-H1-2; 2—FA-H2-2; 3—FA-H3-2; 4—FA-H1-2; 5—FA-H1-3; 6—FA-H1-4; 7—FA-H4-2;
8—FA-C1-2; 9—FA-C2-2; 10—FA-H1-2; 11—FA-H1-3; 12—FB-H1-2; 13—FB-H1-3。

图5 UHPC 荷载-挠度曲线

似呈直线, 试件抗弯刚度大, 弯曲变形小; 2) 挠曲硬化段, 试件挠度逐渐增加, 曲线斜率变小, 呈非线性增长, 加载至一定值时, 底部微细裂缝出现明显扩展, 形成一条主裂缝, 试件抗弯刚度逐渐下降; 3) 软化段, 试件主裂缝宽度不断增加, 曲线缓慢下降, 荷载下降到一定程度时, 主裂缝贯穿整个截面, 试件丧失承载能力。

2.3 承载力和变形分析

弯曲测试结果如表4所示。

结合图5和表4, 钢纤维长径比、掺率、形状

以及试件成型方式对 UHPC 承载力和变形的影响分析如下。

(1) 在相同体积掺率下, 不同纤维长径比的 UHPC 梁均发生挠曲硬化现象, 但挠曲硬化段随纤维长径比的提高变长。相较 FA-H3-2, FA-H2-2 和 FA-H1-2 的峰值荷载分别提高 13.65% 和 20.71%。

(2) 相较 FA-H1-2, FA-H1-3 的峰值荷载和峰值挠度分别提升 4.60% 和 3.45%, FA-H1-4 的峰值荷载和峰值挠度分别提升 11.09% 和 17.72%, 相比 FA-H1-2 和 FA-H1-3, 纤维

表4 弯曲测试结果

试件编号	初裂荷载/kN	初裂挠度/mm	峰值荷载/kN	峰值挠度/mm
F0	—	—	20.180	0.051
FA-H1-2	45.230	0.046	57.833	0.869
FA-H2-2	33.351	0.041	52.116	0.806
FA-H3-2	35.045	0.046	45.857	0.704
FA-H1-3	54.671	0.045	60.495	0.899
FA-H1-4	43.972	0.061	64.245	1.023
FA-H4-2	28.103	0.044	51.497	0.975
FA-C1-2	26.607	0.060	49.058	0.750
FA-C2-2	21.812	0.041	37.273	0.789
FB-H1-2	20.701	0.055	51.871	1.001
FB-H1-3	23.736	0.076	56.981	1.033

掺率为 4% 的 UHPC 梁荷载下降更慢, 荷载 - 挠度曲线更加饱满。

(3) 相较于 FA - H4 - 2, FA - C1 - 2、FA - C2 - 2 的峰值荷载分别降低 4.74% 和 27.62%, 说明弧形钢纤维对 UHPC 峰值强度的提高效果不如端钩形钢纤维。

(4) 相比 FA - H1 - 2, FB - H1 - 2 的初裂荷载下降 54.23%; 相比于 FA - H1 - 3, FB - H1 - 3 的初裂荷载下降 56.58%。原因可能是采用渗浆法导致钢纤维结团, 降低了初裂荷载, 但荷载接近峰值时, UHPC 基体和纤维共同受力, 两种成型方式下 UHPC 基体配合比和纤维特性相同, 峰值荷载变化较小。

3 弯曲韧性分析

弯曲韧性是评估纤维对混凝土开裂后的增韧效果, 一般采用 ASTM C1018 标准评价纤维增强混凝土的韧性。但该方法对初裂点的选取存在较大随意性, 不能很好地评估 UHPC 峰值及峰值后的弯曲韧性^[10-11]。

钢纤维对 UHPC 弯曲韧性的改善主要表现在提高其峰值强度、峰值挠度、残余弯曲强度和持荷能力^[9]。因此, 从能量比与强度比两个角度分别对 UHPC 在挠曲硬化段和软化段的弯曲韧性进行评价。为避免确定初裂点时的人为误差, 将无钢纤维 UHPC 梁的峰值挠度和荷载 - 挠度曲线面积作为 UHPC 基体的初裂挠度和破坏时需要吸收的能量, 弯曲韧性指数 I 与 R 计算公式分别如式 (1) ~ (4) 所示。

$$I = \begin{cases} I_p = \frac{T_p - T_0}{T_0} (\delta_k = \delta_p) \\ I_k = \frac{T_k - T_0}{T_0} (\delta_p = \delta_k) \end{cases} \quad (1)$$

$$R = \begin{cases} R_p = \frac{f_{e,p}}{f_0} (\delta_k = \delta_p) \\ R_k = \frac{f_{e,p}}{f_p} (\delta_p = \delta_k) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} f_{e,p} = \frac{T_p L}{bh^2 \delta_p} \\ f_{e,k} = \frac{(T_k - T_p)L}{bh^2 (\delta_k - \delta_p)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_0 = \frac{P_0 L}{bh^2} \\ f_p = \frac{(P_p L)}{bh^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I 为能量比形式的弯曲韧性指数; I_p 为峰值指数; I_k 为峰后指数; R 为强度比形式的弯曲韧性比; R_p 为峰值韧性比; R_k 为峰后韧性比; δ_p 为峰值挠度, mm; δ_k 为软化段的挠度, mm, $\delta_k = L/k$, L 为试件跨径, mm, 本文取 300mm, k 为系数, 为评估软化段的弯曲韧性, 建议取值为 200、150、100; T_0 为无钢纤维 UHPC 破坏时荷载 - 挠度曲线面积, kN·mm; T_p 为钢纤维增强 UHPC 峰值挠度处荷载 - 挠度曲线面积, kN·mm; T_k 为钢纤维增强 UHPC 软化段挠度处荷载 - 挠度曲线面积, kN·mm; $f_{e,p}$ 和 $f_{e,k}$ 分别为纤维增强 UHPC 的等效峰值强度和等效残余强度, MPa; f_0 、 f_p 分别为无钢纤维 UHPC 和纤维增强 UHPC 的峰值弯曲强度, MPa; b 、 h 分别为试件截面宽度和高度, mm; P_0 、 P_p 分别为无钢纤维 UHPC 和钢纤维增强 UHPC 的峰值荷载, kN。

弯曲韧性指数 I 和 R 计算结果如表 5、6 所示。其中: I_{100} 、 I_{150} 、 I_{200} 分别为 k 取 100、150、200 时的峰后指数; R_{100} 、 R_{150} 、 R_{200} 分别为 k 取 100、150、200 时的峰后韧性比。

3.1 钢纤维长径比的影响

综合表 5、6 可知: 纤维长径比由 37 增加至 50, UHPC 峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 分别提高 23.07%、6.94% 和 23.67%, 峰值韧性比 R_p 提高 7.11%, 峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 和 R_{100} 分别降低 10.56%、13.97% 和 36.67%; 纤维长径比由 50 增加至 65, UHPC 峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别提高 23.89%、20.34%、20.45% 和 42.96%, 峰值韧性比 R_p 提高 17.14%, 峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 和 R_{100} 分别提高 9.25%、7.83% 和 48.33%。

纤维长径比由 37 增加至 50 时, UHPC 峰值韧性有所提升, 但峰后韧性比 R_k 有所降低, 其原因可能是长径比为 50 的纤维直径稍大, 与基体之间的黏结不均匀, 导致 UHPC 峰后荷载下降较快。纤维长径比由 50 增加至 65 时, UHPC 峰值和峰后弯曲韧性均有所提升, 其原因是 UHPC 材料受弯初裂后, 其应力主要通过纤维和基体之间的锚固

表 5 弯曲韧性指数 I 计算结果

试件编号	峰值挠度/mm	峰值指数	I_{200}	I_{150}	I_{100}
F0	0.051	—	—	—	—
FA-H1-2	0.869	85.982	136.482	157.969	194.493
FA-H2-2	0.806	69.403	113.411	131.151	136.050
FA-H3-2	0.704	56.394	106.047	106.047	140.304
FA-H1-3	0.899	98.621	159.118	198.245	253.056
FA-H1-4	1.023	112.533	159.753	206.169	277.866
FA-H4-2	0.975	80.469	125.992	163.201	222.586
FA-C1-2	0.750	54.126	115.689	149.514	197.522
FA-C2-2	0.789	46.913	92.287	117.775	155.431
FB-H1-2	1.001	76.509	119.746	157.227	201.560
FB-H1-3	1.033	72.633	129.766	182.264	251.382

表 6 峰值韧性比 R 计算结果

试件编号	峰值荷载/kN	峰值韧性比	R_{200}	R_{150}	R_{100}
F0	—	—	—	—	—
FA-H1-2	57.833	2.611	0.685	0.551	0.445
FA-H2-2	52.116	2.229	0.627	0.511	0.300
FA-H3-2	45.857	2.081	0.701	0.594	0.410
FA-H1-3	60.495	2.827	0.857	0.770	0.626
FA-H1-4	64.245	2.832	0.874	0.775	0.671
FA-H4-2	51.497	2.617	0.867	0.807	0.702
FA-C1-2	49.058	1.876	0.864	0.801	0.669
FA-C2-2	37.273	1.550	0.861	0.789	0.668
FB-H1-2	51.871	1.976	0.860	0.802	0.621
FB-H1-3	56.981	1.819	1.106	1.033	0.821

作用来承担，长径比较大的纤维和基体间的锚固作用较高^[10]，更能提高 UHPC 弯曲强度。

3.2 钢纤维掺率的影响

综合表 5、6 可知：纤维掺率由 2% 提高至 3%，UHPC 峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别提高 14.70%、16.59%、25.50% 和 30.11%，峰值韧性比 R_p 和峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 、 R_{100} 分别提高 4.60%、25.11%、39.75% 和 40.67%；纤维掺率由 3% 提高至 4%，UHPC 峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别提高 14.17%、3.99%、4.00% 和 9.80%，峰值韧性比 R_p 和峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 、 R_{100} 分别提高 0.18%、1.98%、0.65% 和 7.19%。

UHPC 弯曲韧性指标随纤维掺率的提高而提升，但提升幅度减小。这是因为随着纤维掺率的提高，纤维间距逐渐减小，纤维分布更加紧密，

越能改善 UHPC 弯曲韧性，但掺率过高会导致纤维结团，增强增韧效果减弱。

3.3 钢纤维形状的影响

综合表 5、6 可知：相较 FA-H4-2，FA-C1-2 的峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别降低 32.74%、8.18%、8.37% 和 11.26%，峰值韧性比 R_p 和峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 、 R_{100} 分别降低 28.31%、0.35%、0.74% 和 4.70%；而 FA-C2-2 的峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别降低 41.70%、26.75%、27.83% 和 30.17%，峰值韧性比 R_p 和峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 、 R_{100} 分别降低 40.77%、0.69%、2.23% 和 4.84%。

弧形钢纤维对 UHPC 弯曲韧性的改善效果不及端钩形钢纤维，其原因可能是弧形钢纤维在基体中更容易相互勾连，导致纤维不均匀分布，从而降低纤

维与基体之间的协同作用,降低 UHPC 弯曲韧性。

3.4 试件成型方式的影响

综合表 5、6 可知:相较 FA-H1-2,FB-H1-2 的峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 分别降低 11.02%、12.26% 和 0.47%,峰值韧性比 R_p 降低 24.32%,峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 和 R_{100} 分别提高 25.55%、45.56% 和 39.55%;相较 FA-H1-3,FB-H1-23 的峰值指数 I_p 和峰后指数 I_{200} 、 I_{150} 、 I_{100} 分别降低 26.35%、18.45%、8.06% 和 0.66%,峰值韧性比 R_p 降低 35.78%,峰后韧性比 R_{200} 、 R_{150} 和 R_{100} 分别提高 29.05%、34.16% 和 31.15%。

渗浆法对 UHPC 峰值韧性的提升不及搅拌法,其原因可能是渗浆法分层放置钢纤维,不能保证每一层钢纤维的放置数量保持相近,纤维不均匀分布导致 UHPC 过早破坏,峰值强度和韧性降低。

4 结 论

本文通过对 11 组 UHPC 梁的四点弯曲试验,研究钢纤维长径比、掺率、形状以及试件成型方式对 UHPC 弯曲性能的影响,得出主要结论如下。

(1) 随着端钩形钢纤维长径比增加,UHPC 峰值荷载和峰值韧性呈递增趋势,峰后韧性先降低后提高;纤维体积掺率由 2% 提高至 3% 和 4%,UHPC 的峰值荷载和峰值挠度均增大,表征 UHPC 峰值弯曲韧性的指标 I_p 和 R_p 分别提高约 30.87% 和 8.46%,但提升幅度随体积掺率的提高减小。

(2) 与搅拌法相比,渗浆法成型 UHPC 峰值弯曲韧性有所下降,能量比角度的峰后韧性下降约 0.47%~26.35%,强度比角度的峰后韧性提高约 25.55%~45.56%。

(3) 弧形钢纤维对 UHPC 弯曲韧性的改善效果不及端钩形钢纤维,且弧形钢纤维的曲率半径越大,改善效果越差。

(4) 改进 UHPC 弯曲韧性评价方法,从能量比和强度比两个角度对 UHPC 在挠曲硬化段和软化段的弯曲韧性进行评价,适用性良好。

参考文献:

[1] ALSALMAN A,DANG C N,HALE W M. Development

of ultra-high performance concrete with locally available materials[J]. Construction and Building Materials,2017,133:135-145.

- [2] 李伟,解传凯,姚林,等. 材料组成对超高性能混凝土早期性能的影响[J]. 工程建设,2021,53(10):1-6.
- [3] 赵人达,赵成功,原元,等. UHPC 中钢纤维的应用研究进展[J]. 中国公路学报,2021,34(8):1-22.
- [4] YOO D Y,KANG S T,YOON Y S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC [J]. Construction and Building materials, 2014,64:67-81.
- [5] 陈聪聪,吴泽媚,胡翔,等. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响[J/OL]. 材料导报,2023:1-23[2024-02-17]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=kxD1c6RDvBwJHgrdv2BUBT7i-GNHcuUztfeyZJkeEJv1ImJEhTibYNukGQQAnoQraJEWQwEf3ykGwxgdzCty5iBtqVuru-xx5oYUjfrliLbjSz62mjIHL_yrn_fbbdaI0N5C7lwFGrLYVeON1yP0oFBhy_ZweF7stEuacaDmF4IPrMSoEjX2-TonyO9pX4u&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [6] ZHAO S,SUN W,LANGE D. Deflection-crack mouth opening displacement relationship for concrete beams with and without fibres [J]. Magazine of Concrete Research,2015,67(10):532-540.
- [7] KANG S T,LEE Y,PARK Y D, et al. Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber [J]. Composite structures,2010,92(1):61-71.
- [8] 杨松霖,刁波. 钢纤维形状对超高性能纤维混凝土力学性能的影响[J]. 工业建筑,2012,42(1):140-143;169.
- [9] FARNAMAR Y,MOOSAVI M,SHEKARCHI M, et al. Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression [J]. Cement and Concrete Research,2010,40(11):1571-1581.
- [10] 史占崇,苏庆田,邵长宇. 粗骨料 UHPC 的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. 土木工程学报,2020,53(12):86-97.
- [11] 高丹盈,赵亮平,冯虎,等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报,2014,17(5):783-789.