

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.007

含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究

程 鹏, 吴方红, 曾彦钦, 时豫川
(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 超高性能混凝土(以下简称 UHPC)胶凝材料用量大,生产成本低,因此限制了其工程应用。通过在 UHPC 中适当掺入粗骨料,可有效减少胶凝材料用量,降低成本。设计制作了 7 组含粗骨料的 UHPC 梁试件,通过四点弯曲试验,研究粗骨料质量掺量(0%、15%、30%、40%)和钢纤维体积掺量(0%、1%、2%、3%)对 UHPC 弯曲性能的影响。结果表明:当未掺入钢纤维时,随粗骨料质量掺量增加,UHPC 抗弯强度先降低后提高,且试件均发生脆性破坏;当掺入钢纤维时,UHPC 的初裂强度和极限抗弯强度随钢纤维体积掺量的增加而提高,试件由脆性破坏变为延性破坏;当钢纤维体积掺量为 2% 时,含粗骨料 UHPC 弯曲韧性最高。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC);粗骨料;质量掺量;钢纤维掺量;抗弯强度

中图分类号: TU528.041

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0041-05

Experimental Research on Flexural Properties of Ultra-high Performance Concrete with Coarse Aggregate

CHENG Peng, WU Fanghong, ZENG Yanqin, SHI Yuchuan
(Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (hereinafter referred to as UHPC) has a large amount of cementitious materials and a high production cost, which limits its engineering application. Proper addition of coarse aggregate in UHPC can effectively reduce its cost and dry shrinkage. In order to analyze the effects of coarse aggregate mass fraction (0%、15%、30%、40%) and steel fiber volume content (0%、1%、2%、3%) on bending properties of UHPC, 7 sets of UHPC beams with coarse aggregate were designed to carry out four-point-bend test. The results indicated that: the flexural strength of UHPC decreases first and then increases with the increase of coarse aggregate content for the specimens without steel fibers, and brittle failure occurs in all specimens. When steel fibers are added, the flexural strength of UHPC increases with the increase in mass fraction of coarse aggregates, and the specimens change from brittle failure to ductile failure. Increasing the volume fraction of steel fibers can significantly enhance the first cracking load and flexural strength. When the volume fraction of steel fiber is 2%, the UHPC with coarse aggregate has the highest flexural toughness.

Keywords: ultra-high performance concrete (UHPC); coarse aggregate; mass fraction; steel fiber content; flexural strength

UHPC 是一种新型混凝土,具有强度高^[1],延性好,耐久性优异^[2]等优点,可大幅度提高结构的承载能力及使用寿命,减小构件截面尺寸。UHPC 自问世以来,不断被应用于各类工程实践中,但由于其成本较高,干缩较大,制造程序复杂,其应用发展远低

于预期^[3]。

通过在 UHPC 中适当掺入粗骨料,可有效降低其生产成本,减小养护过程中 UHPC 的干缩,提高 UHPC 的工程应用性。目前国内外学者对 UHPC 的配合比与基本力学性能进行了大量的研究,取得了

丰富的成果^[4-10],同时对含粗骨料的 UHPC 也进行了相应研究。朋改非等^[11]对含粗骨料 UHPC 的抗压强度影响因素进行了研究。Liu 等^[12]研究了粗骨料掺量对 UHPC 抗拉性能的影响。Li 等^[13]对加入玄武岩的 UHPC 的力学性能进行了研究。但关于在不同粗骨料质量掺量和不同钢纤维掺量下 UHPC 的抗弯性能及其破坏机理的分析,研究尚少。

混凝土的抗弯性能^[14-15]是混凝土的重要力学性能之一,是研究混凝土构件及结构分析的基础。因此,开展含粗骨料 UHPC 的抗弯性能研究,对丰富 UHPC 基础理论研究具有十分重要的科学意义和应用价值。本文设计、制作了 7 组掺入粗骨料的 UHPC,对含粗骨料的 UHPC 的配合比和抗弯性能进行研究,分析粗骨料质量掺量及钢纤维体积掺量对其抗弯强度,弯曲韧性的影响,可为工程设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验总体设计

为分析粗骨料质量掺量和钢纤维体积掺量对 UHPC 抗弯性能的影响,本文选取粗骨料的质量掺量为 0%、15%、30%、40%,均为粗骨料质量占全部试验材料总质量的比例,钢纤维体积掺量为 0%、1%、2%、3%,共设计制作了 21 个梁试件,分为 7 组,每组 3 个试件,尺寸统一为 100 mm × 100 mm ×

400 mm。

1.2 试验材料选用

胶凝材料选用(P.O.52.5)普通硅酸盐水泥、I 级粉煤灰和硅灰,其组成成分见表 1;采用细度模数为 2.8 的中砂;粗骨料均采用连续级配,粒径为 5 mm ~ 20 mm 的花岗岩碎石,其级配曲线见图 1;钢纤维采用镀铜平直型纤维,长度为 12 mm,直径为 0.2 mm,抗拉强度 > 2 000 MPa;减水剂采用减水率为 25% 的聚羧酸高效减水剂。

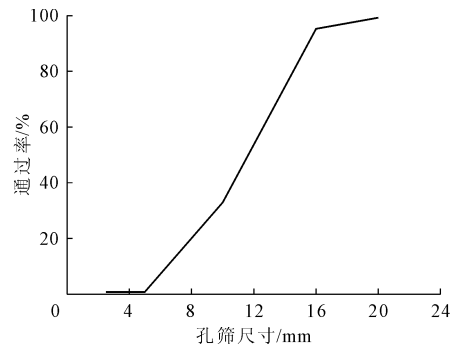


图 1 粗骨料级配曲线

1.3 配合比设计

基于《活性粉末混凝土》^[16](GB/T 31387—2015)等规范及国内外学者的研究结论^[17-18],本文试验的设计配合比如表 2 所示。所有试件均在同一条件下浇筑和养护(在标准条件下养护 28 d)。

表 1 胶凝材料 XRF 成分分析

单位: %

材料类别	不同成分含量												
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	CaO	K ₂ O	MnO	ZnO	SrO	ZrO ₂
水泥	0.079	2.140	4.500	19.58	3.060	3.119	0.128	64.94	0.750	0.127	0.024	0.148	0.012
硅灰	0.068	0.224	0.354	92.87	1.260	0.113	0.110	0.213	0.332	0.008	0.019	0.005	—
粉煤灰	0.552	0.575	30.630	48.74	0.706	2.611	0.247	2.440	1.250	0.016	0.013	0.060	0.044

表 2 UHPC 配合比

试件组别	水泥量 /(kg·m ⁻³)	硅灰量 /(kg·m ⁻³)	粉煤灰量 /(kg·m ⁻³)	水量 /(kg·m ⁻³)	减水剂量 /(kg·m ⁻³)	钢纤维 含量/%	细骨料量 /(kg·m ⁻³)	粗骨料量 /(kg·m ⁻³)
UR00S0	759	108	217	217	33	0	1192	0
UR15S0	645	92	184	184	28	0	1013	375
UR30S0	531	76	152	152	23	0	835	750
UR40S0	486	69	139	139	21	0	763	1000
UR30S1	462	66	132	132	20	1	726	750
UR30S2	514	73	147	147	22	2	807	750
UR30S3	490	70	140	140	21	3	770	750

注:U 表示 UHPC,R 表示粗骨料掺量,中间数字表示粗骨料质量掺量百分比,末尾 S 表示钢纤维体积掺量,末尾数字表示钢纤维体积掺量大小。UR30S2 表示粗骨料质量掺量为 30%,钢纤维体积掺量为 2%。

1.4 加载装置与制度

选用最大载荷为 300 kN 的 MTS 万能试验机,利

用四点弯曲试验装置进行加载,如图 2 所示。支座跨度为 300 mm,并在两侧中心安装位移计测量试件跨

中挠度值,试件挠度值取两个位移计读数的平均值。

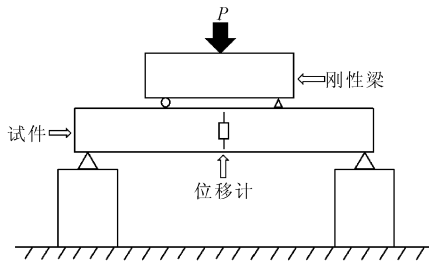
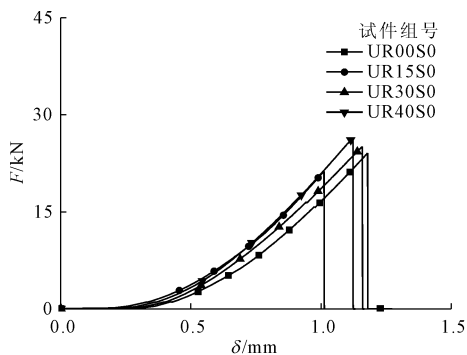


图 2 试验装置示意图

试验加载制度采用位移加载控制制度,加载速



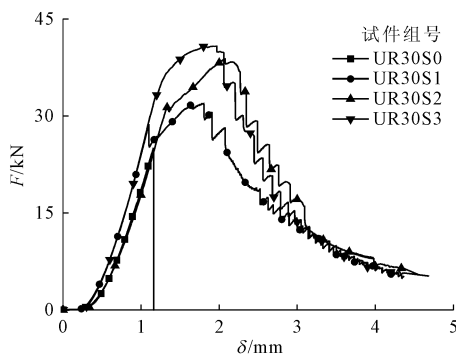
(a) 粗骨料质量掺量对比

率为 0.1 mm/min,加载至试件完全破坏时停止加载。为了便于观察裂缝开展,在试件加载开始前对其外表面进行了粉刷,试验时首先将试件置于支座上并对中,位移传感器对称安置于试件跨中,然后开始正式加载。

2 试验现象及结果分析

2.1 试验现象

试验所得荷载 - 挠度曲线如图 3 所示(每个试验组取其中最具代表性的一条)。



(b) 钢纤维掺量对比

图 3 荷载 - 挠度曲线

对于未掺入钢纤维的试件,荷载 - 挠度曲线仅包含弹性阶段,当荷载达到初裂荷载时,纯弯段出现裂缝,试件迅速沿裂缝断裂,失去承载能力,表现出明显的脆性破坏,如图 4 所示。试验中发现粗骨料质量掺量的改变对试件破坏形态并无明显影响。



图 4 脆性破坏

在粗骨料质量掺量为 30% 的试验组中加入钢纤维,其荷载 - 挠度曲线大致分为三个阶段,第一阶段曲线仍为弹性阶段,当荷载达到比例极限时,在纯弯段出现主裂缝;第二阶段为裂缝扩展阶段,此时荷载增速减慢,曲线斜率明显减小,主裂缝不断沿竖向扩展,并发出纤维拔出的声响;第三阶段为破坏阶段,当荷载达到极限抗弯强度后,荷载随着挠度的增大而减小,曲线逐渐下降,下降时主要由钢纤维抵抗裂缝开展。加入钢纤维后试件均表现为延性破坏,

如图 5 所示,且钢纤维体积掺量提高,试件极限抗弯强度增大。

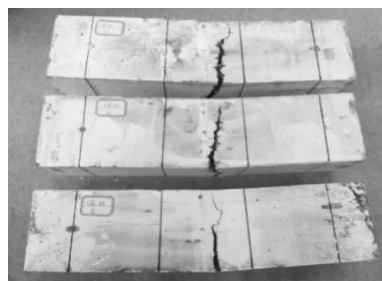


图 5 延性破坏

2.2 弯曲初裂强度分析

根据试验结果,对每组试件的初裂荷载 F_{cr} 、初裂挠度 δ_{cr} 、峰值荷载 F_c 、峰值挠度 δ_c 取平均值,结果如表 3 所示。

采用文献[9]中的公式计算试件的弯曲初裂强度 f_{cr} :

$$f_{cr} = \frac{F_{cr}L}{bh^2} \quad (1)$$

式中: F_{cr} 为初裂荷载,对于无钢纤维试件,取峰值荷载,加入钢纤维试件,取拐点处荷载; L 为试件跨距,本文试验为 300mm; b 、 h 分别为试件宽度与高度,本文试验均为 100 mm。

表 3 力学性能指标

试件组别	试件数量	f_{cr} /MPa	δ_{cr} /mm	f_c /MPa	δ_c /mm
UC00S0	3	7.24	1.18	7.24	1.18
UC15S0	3	6.38	1.01	6.38	1.01
UC30S0	3	7.52	1.16	7.52	1.16
UC40S0	3	7.93	1.12	7.93	1.12
UC30S1	3	8.62	1.10	9.61	1.60
UC30S2	3	9.41	1.34	11.68	1.82
UC30S3	3	10.77	1.29	12.32	1.60

由计算结果分析可知:

对于不掺入钢纤维的试件,当粗骨料质量掺量从 0% 增加到 15% 时,试件弯曲初裂强度不断减小;当粗骨料质量掺量从 15% 增加到 30% 时,试件弯曲初裂强度先减小后增大(存在弯曲初裂强度最小值);当粗骨料质量掺量从 30% 增加到 40% 时,试件弯曲初裂强度不断增大。这是由于当开始加入粗骨料时,胶凝材料的体积会不断减小,同时粗骨料与基体之间薄弱界面会不断增大,从而降低了试件的弯曲初裂强度;但随着粗骨料质量掺量不断提高,试件中粗骨料承载比重会逐渐增加,由于粗骨料强度高于水泥基体强度,使得试件弯曲初裂强度开始逐渐增大。

在粗骨料质量掺量 30% 的试件中掺入钢纤维,试件弯曲初裂强度随钢纤维体积掺量的增加有显著提高。这是由于钢纤维的桥接作用,抑制了裂纹的扩展,提高了基体的承载能力,使得试件弯曲初裂强度增大。钢纤维体积掺量提高 1%,弯曲初裂强度增幅为 12% ~ 15%,当钢纤维体积掺量为 3% 时,弯曲初裂强度最大。

2.3 极限抗弯强度分析

进一步分析含粗骨料的 UHPC 抗弯承载力,按式(2)计算试件的极限抗弯强度 f_c ,

$$f_c = \frac{F_c L}{bh^2} \quad (2)$$

式中: F_c 为峰值荷载,对于无钢纤维试件,其峰值荷载与初裂荷载相同。

由于不掺入钢纤维试件的极限抗弯强度 f_c 与弯曲初裂强度 f_{cr} 相同,粗骨料质量掺量对极限抗弯强度的影响与 2.2 中相同,此处不再赘述;对于掺入钢纤维的试件,其计算结果如图 6 所示。

由计算结果可知,当钢纤维体积掺量从 0% 增加到 3% 时,试件极限抗弯强度不断提高;当钢纤维掺量从 0% 增加到 1% 时,极限抗弯强度提高 28%,

增幅最大。这是由于试件开裂时钢纤维的桥接作用抑制了混凝土裂缝的张开和扩展,从而极大提高了试件的抗弯强度。

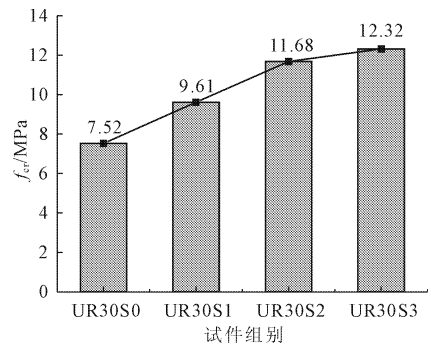


图 6 极限抗弯强度

随着钢纤维掺量继续增加,极限抗弯强度增幅逐渐减小,钢纤维掺量从 2% 增加到 3% 时,极限抗弯强度提高 5%,钢纤维增强对极限抗弯强度的增强作用较小。这是由于当钢纤维增多后,其在混凝土基体中易发生结团现象,不能均匀地分散在基体中,使得钢纤维在裂缝开展时不能充分发挥其桥接作用,因此极限抗弯强度增幅较小。

2.4 弯曲韧性指数分析

根据《纤维混凝土试验方法》^[19](CECS13:2009)中弯曲韧性的评定方法,在荷载-挠度曲线中按初裂挠度的倍数 $3\delta_{cr}$ 确定计算点,依照式(3)计算出弯曲韧性指数 η_3 ,以此评价材料弯曲韧性,

$$\eta_3 = \frac{S_{OACD}}{S_{OAB}} \quad (3)$$

式中: S_{OAB} 为挠度达到初裂挠度 δ_{cr} 时曲线与坐标轴围成的面积; S_{OACD} 为挠度达到 3 倍初裂挠度 $3\delta_{cr}$ 时曲线与坐标轴围成的面积,如图 7 所示。

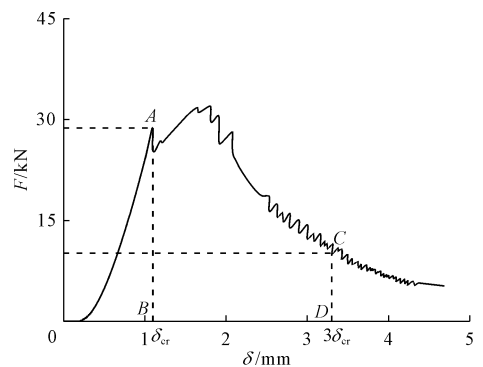


图 7 计算示意图

对于未掺入钢纤维的试件,由于荷载达到初裂荷载后试件立即破坏,因此按公式(3)计算所得弯曲韧性指数均为 1。以 3 个试件计算值的算术平均数

值作为该组试件的弯曲韧性指数,计算结果如表 4 所示。

表 4 弯曲韧性指数

试件组别	试件数量	η_3
UC00S0	3	1.00
UC15S0	3	1.00
UC30S0	3	1.00
UC40S0	3	1.00
UC30S1	3	5.72
UC30S2	3	5.84
UC30S3	3	5.05

基于计算结果可知,在含粗骨料的 UHPC 中掺入钢纤维可以显著提高材料延性,使材料由脆性材料变成延性材料。对于理想弹塑性材料,超过初裂荷载后荷载-挠度曲线为水平直线,由式(3)所得弯曲韧性指数为 5,在三种钢纤维体积掺量下,材料的弯曲韧性指数都超过了理想弹塑性材料的弯曲韧性指数,均具有较高的弯曲韧性。

当钢纤维体积掺量由 1% 提高至 2% 时,材料弯曲韧性达到最高,由 2% 提高至 3% 时,弯曲韧性有较为明显的降低,这是由于掺入较多钢纤维后,进行搅拌时钢纤维不易分散,钢纤维在水泥基体中会发生结团现象,不能充分发挥钢纤维在裂缝开展时的桥接作用,使得材料弯曲韧性降低,这与 2.3 中规律相同。建议工程中钢纤维体积掺量取 2% 为宜。

3 结 论

(1) 当粗骨料质量掺量从 0% 提高至 40% 时,对于未掺入钢纤维的含粗骨料的 UHPC,材料的弯曲初裂强度先减小后增大,粗骨料质量掺量在 15% ~ 30% 时出现最小值,且材料在达到弯曲初裂强度后立即破坏,为脆性破坏。

(2) 当钢纤维体积掺量从 1% 提高至 3% 时,对于粗骨料质量掺量为 30% 的 UHPC,材料的弯曲初裂强度及极限抗弯强度随钢纤维体积掺量的提高而增大,且材料均为延性破坏,钢纤维体积掺量在 2% 左右时材料弯曲韧性最高。

参考文献:

[1] 郭晓宇,亢景付,朱劲松.超高性能混凝土单轴受压本构关系[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):369-376.

[2] 张宇,鲍小宇,彭晓静,等.超高性能混凝土的材料性能[J].山西建筑,2018,44(21):95-96.

[3] 王德辉,史才军,吴林妹.超高性能混凝土在中国的研

究和应用[J].硅酸盐通报,2016,35(1):141-149.

- [4] 胡翱翔,梁兴文,于婧,等.超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(9):30-37.
- [5] 刘超,黄钰豪,马汝杰,等.高应变强化超高性能混凝土 T 形梁抗弯承载力[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):744-750.
- [6] Chen B C, An M Z, Huang Q W, et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering in China [C]//Fist International Interactive Symposium on UHPC, 2016.
- [7] 马恺泽,马煜东,刘伯权.超高性能混凝土柱偏心受压性能试验研究[J].工程科学与技术,2018,50(3):201-208.
- [8] Yoo D Y, Min K H, Lee J H, et al. Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age[J]. Construction & Building Materials, 2014, 73:357-365.
- [9] 陈宝春,李聪,黄伟,等.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(1):13-28.
- [10] 田育功.大坝与水工混凝土关键核心技术综述[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(5):23-30,52.
- [11] 朋改非,杨娟,高育欣,等.含粗骨料的超高性能混凝土抗压强度的影响因素[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2012,33(6):5-9.
- [12] Liu J, Han F, Cui G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121:310-318.
- [13] Li P P, Yu Q L, Brouwers H J H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC) [J]. Construction & Building Materials, 2018, 170:649-659.
- [14] 贾金青,周佳玉,叶浩,等.后掺骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):5-10.
- [15] 张程华,邱继生,侯丕吉,等.中高层生态复合墙体正截面压弯承载力分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):144-150.
- [16] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [17] 张云升,张文华,陈振宇.综论超高性能混凝土:设计制备·微观结构·力学与耐久性·工程应用[J].材料导报,2017,31(12):1-15.
- [18] 邓明科,孙宏哲,梁兴文,等.延性纤维混凝土抗弯性能的试验研究[J].工业建筑,2014,44(5):85-90.
- [19] 纤维混凝土试验方法:CECS13:2009[S].北京:中国计划出版社,2009.