

含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究^{*}

黄政宇[†], 李仕根

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对超高性能混凝土(UHPC)胶凝材料用量大,前期成本高等问题,通过在UHPC体系中掺入粗骨料,用河砂代替石英砂,成功制备了具有优异力学性能的含粗骨料UHPC,并通过试验研究了粗骨料掺量以及钢纤维几何参数对含粗骨料UHPC力学性能的影响.结果表明:随着粗骨料掺量的增加(0~800 kg/m³),UHPC抗压强度先增加后下降,静力受压弹性模量几乎呈线性增加;粗骨料掺量为0~400 kg/m³时,UHPC抗弯拉强度和初裂强度变化较小,粗骨料掺量为400~800 kg/m³时,UHPC抗弯拉强度和初裂强度明显下降;随着粗骨料掺量的增加(0~800 kg/m³),UHPC弯拉荷载-挠度曲线变化明显,弯曲韧性明显下降,但均存在应变硬化过程;随着钢纤维长度增加,UHPC的抗压强度、抗弯拉强度以及弯曲韧性均增加,但是静力受压弹性模量和初裂强度变化较小.

关键词:超高性能混凝土;粗骨料;力学性能;弯曲韧性

中图分类号:TU528.31

文献标志码:A

Study on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete with Coarse Aggregate

HUANG Zhengyu[†], LI Shigen

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to the problems of large amount of cementitious material and high cost of Ultra High Performance Concrete (UHPC), the UHPC system was mixed with coarse aggregate and river sand instead of quartz sand, and the preparation of UHPC with coarse aggregate is successful resulting in excellent mechanical properties. Meanwhile, the effects of the coarse aggregate content and geometric parameters of the steel fiber on the mechanical properties of the UHPC with coarse aggregate were studied. The results showed that, with the increase of coarse aggregate content (0~800 kg/m³), the compressive strength of UHPC increased firstly and then decreased, the elastic modulus increased almost linearly. When the content of coarse aggregate was in 0~400 kg/m³, the flexural strength and initial crack strength of UHPC changed little, while when the content of coarse aggregate was 400~800 kg/m³, the flexural strength and initial crack strength of UHPC decreased obviously. With the increase of the content of coarse aggregate (0~800 kg/m³), the flexural load-deflection curve of UHPC was obviously changed, and the

^{*} 收稿日期:2017-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1305245), National Natural Science Foundation of China(U1305245)

作者简介:黄政宇(1959-),男,湖南湘潭人,湖南大学教授

[†] 通讯联系人, E-mail: zyhuang@hnu.edu.cn

flexural toughness decreased obviously, but a strain-hardening process was observed. With the increase of the length of steel fiber, the compressive strength, flexural strength and flexural toughness of UHPC increased, but the static compression modulus and initial crack strength of UHPC changed little.

Key words: Ultra High Performance Concrete(UHPC); coarse aggregate; mechanical properties; flexural toughness

20世纪90年代,法国学者 Richard 和 Sedran^[1-2]基于均布超细致密体系(DSP)原理,采取剔除粗骨料,粉体粒径按最紧密堆积原理最优化,提高材料组分的匀质性和活性;掺入钢纤维,提高材料韧性;同时在凝结、硬化过程中适当加压、加热,改善微孔隙结构,从而获得一种新型的优质水泥基材料——活性粉末混凝土(RPC). 1994年, Sedran^[2]将这种强度高、韧性大、耐久性优异的水泥基材料命名为超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC).

目前,法国、日本、美国、中国等国相继制定并颁布了 UHPC 材料及结构设计的技术规范或施工指南,对于无粗骨料的 UHPC 的理论研究和工程应用已相对成熟^[3-8]. 但是,与普通混凝土相比, UHPC 仍存在一些不足: 1) 原材料和配比的影响因素多^[8],同时水胶比低,胶凝材料无法充分水化; 2) 胶凝材料用量大,早期收缩大^[9],对 UHPC 后期强度和耐久性产生不利影响; 3) 生产成本低^[10-11],单位立方米 UHPC 的价格达到数千元. 在 UHPC 体系中掺入粗骨料可在一定程度上改善 UHPC 上述不足: 1) 减少单方胶凝材料的用量^[10],降低生产成本,减少收缩; 2) 粗骨料形成刚性骨架,咬合作用强^[12],抑制 UHPC 收缩开裂^[13-14]. 近年来,为了拓宽 UHPC 的应用领域和满足工程大规模施工的需求,在 UHPC 体系中引入粗骨料逐渐引起了各国学者的关注. Hoang 等^[13]基于最大堆积理论在 UHPC 体系中掺入粗骨料,研究表明,含粗骨料 UHPC 的抗压强度、弹性模量比无粗骨料 UHPC 均得到提高,其中掺 620 kg/m³最大粒径为 8 mm 粗骨料 UHPC 的抗压强度、弹性模量分别达到 185.6 MPa 和 57 GPa. Yang 等^[14]成功制备具有优异流动性、耐久性能以及 56 天抗压强度达 150 MPa 含粗骨料 UHPC. Liu 等^[15]研究了不同粗骨料质量分数与 4 种类型钢纤维对 UHPC 轴拉性能的复合增强作用,研究表明粗骨料的掺入仍然可以使 UHPC 具有应变硬化特性.

但是,关于在 UHPC 体系中掺入粗骨料造成的

力学性能影响的报道仍然很少,亦未见国内外颁布相关规范,因此含粗骨料超高性能混凝土的力学性能有待进一步研究. 本文为了减少 UHPC 的胶凝材料用量,在 UHPC 体系中掺入粗骨料,用河砂取代石英砂,同时大量文献^[3,16]指出,在几何参数相同的情况下,端钩型钢纤维对于 UHPC 具有最优增强作用,所以本文选取不同几何参数的端钩型钢纤维,重点研究了粗骨料掺量以及粗骨料与不同几何参数钢纤维搭配对 UHPC 抗压强度、轴心抗压强度、静力受压弹性模量、抗弯拉强度以及弯曲韧性的影响.

1 试验

1.1 原材料

水泥:葛洲坝水泥集团出厂的三峡牌 P·O 42.5 级高抗硫酸盐水泥,其主要技术特性见表 1. 硅灰:山西某铁合金有限公司生产原状硅灰,其主要技术特性见表 2. 超细矿粉:济南某新型建材有限公司生产,其主要技术特性见表 3. 粉煤灰:北京某粉煤灰公司生产的一级粉煤灰,其主要技术特性见表 4. 河砂:南京地区天然河砂,最大粒径为 2.5 mm,表观密度 2 750 kg/m³. 石子:南京地区玄武岩碎石,主要技术指标见表 5. 钢纤维:上海某纤维公司生产的镀铜微细端钩钢纤维,一种长度为 13 mm,直径 0.22 mm,另一种长度 25 mm,直径 0.3 mm,抗拉强度均大于 1 200 MPa. 减水剂:苏州某外加剂公司生产的高性能聚羧酸粉体减水剂,减水率大于 35%.

表 1 水泥的主要技术指标

平均粒径 / μm	质量分数/%			抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
	C ₃ A	C ₃ S	SO ₃	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
15	3	40	2	30.5	42.2	50.2	6.5	7.7	10.2

表 2 硅灰的主要技术指标

平均粒径 / μm	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	质量分数/%		
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO
0.1	18 500	93.9	0.59	1.5

表 3 超细矿粉的主要技术指标

Tab. 3 Main technical indexes of ultrafine mineral powder

平均粒径 / μm	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	烧失量 /%	7 d 活性指数 /%	28 d 活性指数 /%
3	800	≤ 0.5	> 120	> 135

表 4 粉煤灰的主要技术指标

Tab. 4 Main technical indexes of fly ash

平均粒径 / μm	质量分数 /%		7 d 活性指数 /%	28 d 活性指数 /%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
6	50	20	> 80	> 110

表 6 UHPC 配合比设计

Tab. 6 Mix design of UHPC

编号	配合比 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$					水胶比	减水剂质量分数 /%	钢纤维体积分数 /%	钢纤维长度 /mm	粗骨料掺量 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	水泥	硅灰	粉煤灰	矿粉	河砂					
A0	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	25	0
A1	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	25	200
A2	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	25	400
A3	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	25	600
A4	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	25	800
A5	890	222	89	178	800	0.16	2.5	2	13	600

1.3 试验过程与测试方法

1.3.1 试件制备与养护

按试验设计配合比称量好各原材料的质量,将水泥、硅灰、粉煤灰、超细矿粉、砂、石子、减水剂倒入强制式混凝土搅拌机内,首先干拌 6 min 后加入称量好的水,搅拌至混凝土完全流化后,再将钢纤维用 5 mm 的圆孔筛筛入搅拌机继续搅拌 5 min,装入钢模,在试块表面及时覆盖塑料薄膜并将试件移入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 室内养护 48 h 后拆模,拆模之后用 90°C 热水养护 48 h 即可。

1.3.2 测试方法

立方体抗压强度与轴心抗压强度测试按照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》标准进行测试,加载速率为 $1.2 \sim 1.4 \text{ MPa/s}$,每组 3 个试件,记录下试件破坏的最大荷载并计算。

抗弯拉强度测试按照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》标准进行测试,加载速率为 $0.08 \sim 0.1 \text{ MPa/s}$,每组 3 个试件,记录试件破坏最大荷载并计算。静力受压弹性模量测试按照 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》标准进行测试,每组 6 个试件,加载与卸载速率均为 $1.2 \sim 1.4 \text{ MPa/s}$,记录千分表位移值与对应荷载并计算弹性模量值。测试装置如图 1 所示。

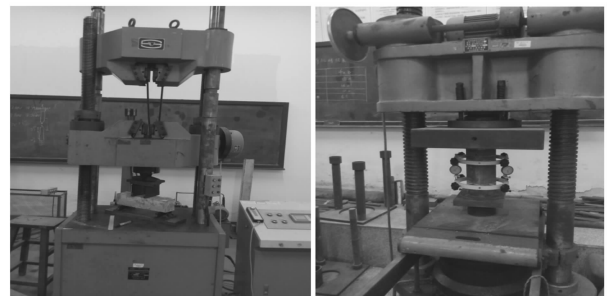
表 5 玄武岩碎石主要技术指标

Tab. 5 Main technical indexes of Basalt stone

最大粒径 /mm	表观密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 /MPa	压碎指标 /%	弹性模量 /GPa
8	2 770	300	5.4	98

1.2 试验方案设计

本试验研究了不同粗骨料掺量以及钢纤维几何参数对 UHPC 立方体抗压强度、轴心抗压强度、静力受压弹性模量、抗弯拉强度以及弯曲韧性的影响,具体试验配比设计见表 6。

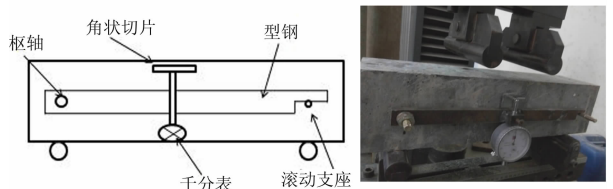


(a) 抗弯拉强度测试装置 (b) 静力受压弹性模量测试装置

图 1 抗弯拉强度以及静力受压弹性模量测试装置

Fig. 1 Flexural tensile strength and static compression elastic modulus test device

弯曲韧性以及初裂强度测试按照 CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》进行测试,按照三分点加载的方式均匀连续加载,加载速率为 0.1 mm/min ,为确保位移测定的准确性,消除试验机本身变形的影响,本试验试件挠度位移采用千分表单独测定,弯曲韧性测试装置见图 2。



(a) 装置示意图

(b) 实物图

图 2 弯曲韧性测试装置

Fig. 2 Flexural toughness test device

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

图3和图4分别为不同粗骨料掺量的UHPC立方体抗压强度和轴心抗压强度图。从图3和图4可以看出,当粗骨料掺量不大于 400 kg/m^3 时,随着粗骨料掺量的增加,UHPC的立方体抗压强度和轴心抗压强度都得到提高,当粗骨料掺量为 400 kg/m^3 时,UHPC立方体抗压强度和轴心抗压强度均达到最大值(分别为 180.1 MPa 和 154.1 MPa),比无粗骨料UHPC抗压强度分别提高了 3.7% 和 6.8% ,但是,随着粗骨料掺量继续增加,UHPC立方体抗压强度和轴心抗压强度均降低,粗骨料掺量为 800 kg/m^3 时,UHPC立方体抗压强度比无粗骨料UHPC降低了 7.1% ,而UHPC轴心抗压强度仍比无粗骨料UHPC提高了 2.9% 。

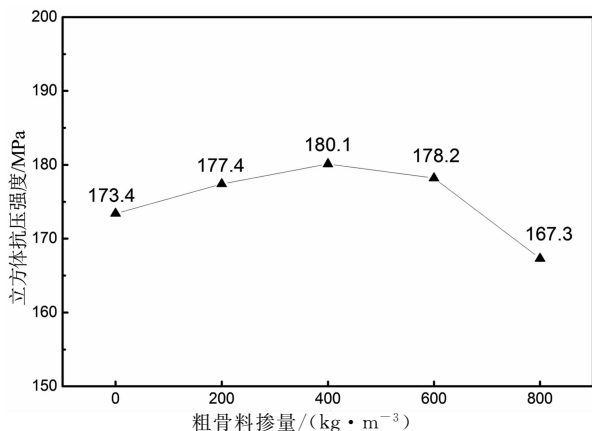


图3 不同粗骨料掺量的UHPC立方体抗压强度

Fig. 3 Cube compressive strength of UHPC with different coarse aggregate content

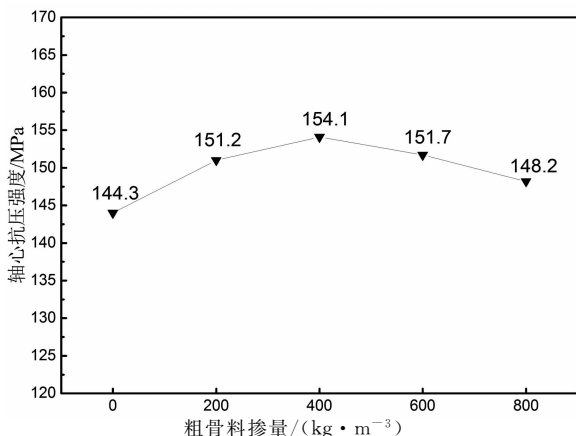


图4 不同粗骨料掺量的UHPC轴心抗压强度

Fig. 4 Axial compressive strength of UHPC with different coarse aggregate content

UHPC抗压强度随着粗骨料掺量的增加($0\sim 400\text{ kg/m}^3$)得到提高的原因主要有以下两个方面:玄武岩粗骨料本身岩石抗压强度高,并且骨料最大粒径只有 8 mm 以及碎石表面粗糙,这提高了UHPC基体与骨料界面过渡区的粘结能力;粗骨料在UHPC体系内形成刚性骨架,骨料咬合作用增强^[12],提高了UHPC整体受压性能.文献^[13-14]研究结果也表明粗骨料的加入可以提高UHPC的抗压强度.但是UHPC抗压强度随着粗骨料掺量继续增加会降低是因为:粗骨料掺量过大会导致UHPC工作性能急剧下降,如图5所示,试验中发现粗骨料掺量从 0 增加到 800 kg/m^3 ,UHPC的坍塌扩展度从 920 mm 降低到 330 mm ,并且钢纤维结团现象严重,导致UHPC内部缺陷增多.粗骨料掺量为 800 kg/m^3 时,UHPC轴心抗压强度仍比无粗骨料UHPC高,这是因为粗骨料形成的刚性骨架在棱柱体试件受压过程中较立方体试件对强度贡献更大。

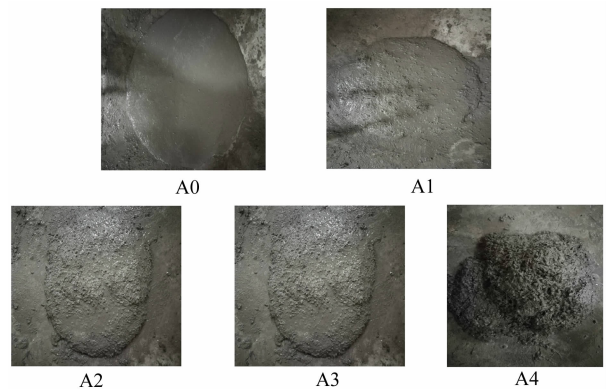


图5 不同粗骨料掺量的UHPC工作性能

Fig. 5 Workability of UHPC with different coarse aggregate content

图6和图7分别为不同钢纤维长度UHPC立方体抗压强度和轴心抗压强度图。由图6和图7可以看出,钢纤维长度为 25 mm 的UHPC立方体抗压强度和轴心抗压强度比钢纤维长度为 13 mm 的UHPC的立方体抗压强度和轴心抗压强度分别提高了 17.3% 和 16.5% .文献^[17]研究表明:长径比不同的钢纤维对于UHPC的抗压强度影响差别较小,这与本文研究结果不一致是因为文献^[17]中骨料最大粒径为 0.9 mm ,而本试验在UHPC中掺入了最大粒径为 8 mm 粗骨料,纤维对粗骨料具有锚固作用,长纤维较短纤维对粗骨料具有更好的锚固能力,对UHPC抗压强度贡献更大。

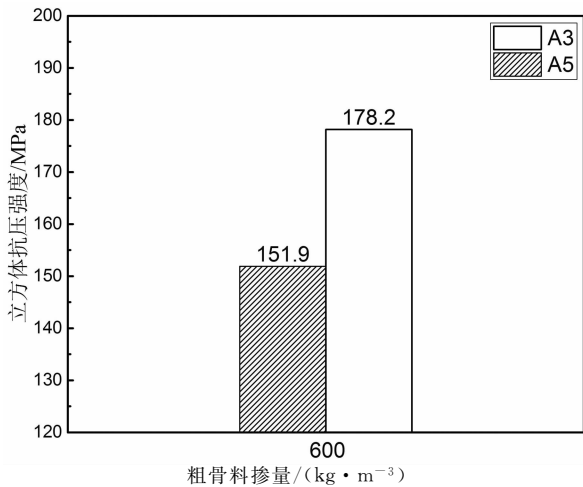


图 6 不同钢纤维长度 UHPC 立方体抗压强度
Fig. 6 Cube compressive strength of UHPC with different steel fiber length

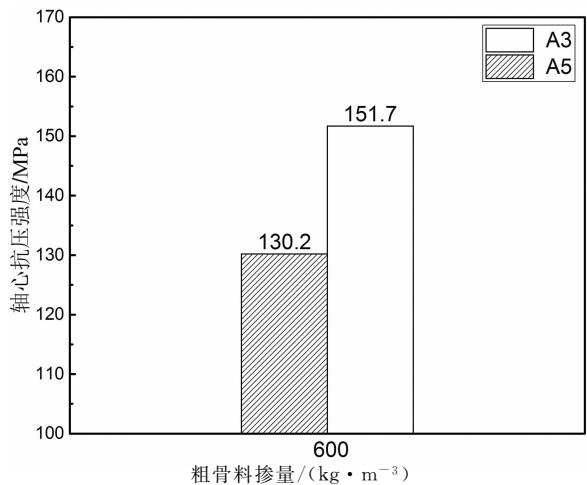


图 7 不同钢纤维长度 UHPC 轴心抗压强度
Fig. 7 Axial compressive strength of UHPC with different steel fiber length

2.2 静力受压弹性模量

图 8 为不同粗骨料掺量 UHPC 的静力受压弹性模量图.从图 8 可以看出,随着粗骨料掺量的增加,UHPC 静力受压弹性模量几乎呈线性增长,这与抗压强度和轴心抗压强度的结果明显不同,粗骨料掺量为 800 kg/m^3 的 UHPC 的弹性模量达到 58.35 GPa ,比无粗骨料 UHPC 提高了 25.6% .文献[13]中 UHPC 体系中掺入 620 kg/m^3 玄武岩碎石,其弹性模量也达到了 57.0 GPa ,较无粗骨料 UHPC 也得到较大提高,这与本文研究结果相近.这主要是因为:玄武岩碎石本身岩石弹性模量高,对 UHPC 弹性模量存在增强效应,粗骨料掺量越大,UHPC 的弹性模量越大;粗骨料掺量过大虽然会造成 UHPC 基体骨料界面过渡区微裂缝增加,但是弹性模量的测定在 UHPC 受压弹性阶段进行,界面过

渡区影响相对较小.

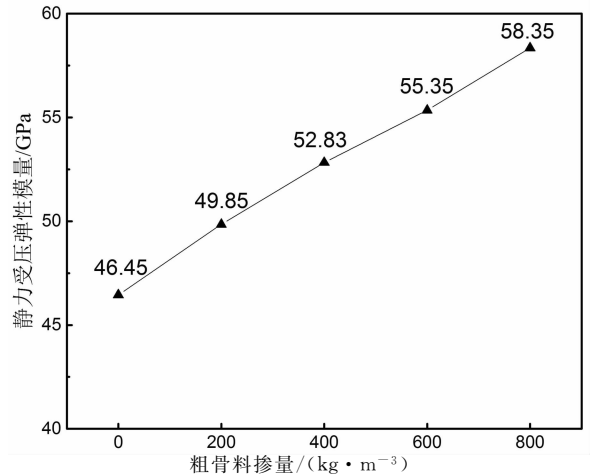


图 8 不同粗骨料掺量 UHPC 的静力受压弹性模量
Fig. 8 Static compressive elastic modulus of different coarse aggregate content

图 9 为不同钢纤维长度 UHPC 静力受压弹性模量图.从图 9 可以看出,使用不同长度钢纤维时,UHPC 的弹性模量相差较小,这是由于弹性模量的测定是在 UHPC 受压弹性阶段进行,钢纤维在这一阶段发挥的作用较小,所以对于弹性模量影响较小.

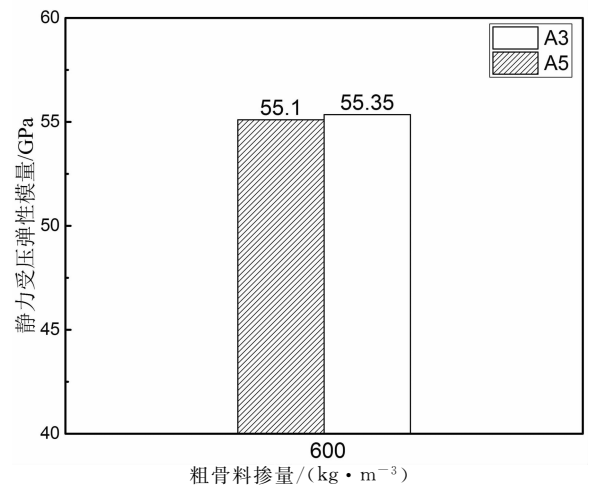


图 9 不同钢纤维长度 UHPC 静力受压弹性模量
Fig. 9 Static compressive elastic modulus of different steel fiber length

2.3 抗弯拉强度

图 10 为不同粗骨料掺量 UHPC 抗弯拉强度的实测值.

从图 10 可以看出,在粗骨料掺量不大于 400 kg/m^3 时,粗骨料掺量对 UHPC 抗弯强度影响较小,但是,当粗骨料掺量增大到 600 kg/m^3 及 800 kg/m^3 时,UHPC 抗弯拉强度下降明显.这是因为:在粗骨料掺量少时,UHPC 基体相对较多,钢纤维

的分布较均匀,纤维有效利用率较高,UHPC基体与钢纤维的粘结力依然发挥了很大的作用;高弹性模量粗骨料形成的刚性骨架对抗弯拉强度的提高有更大的贡献,同时骨料咬合作用对裂缝的发展有较大的阻碍作用^[12],可以在一定程度上弥补粗骨料加入引起纤维利用率下降的负面效应,所以粗骨料的掺量不大时,UHPC抗弯拉强度影响不大.当粗骨料掺量达到 600 kg/m^3 和 800 kg/m^3 时,如图5所示,UHPC的工作性能急剧下降,钢纤维分布不均,结团严重,并且UHPC基体较少,纤维与基体之间的粘结作用减小,从而导致UHPC抗弯拉强度明显下降.而文献^[15]也指出随着粗骨料掺量的增加,钢纤维与UHPC基体之间的粘结力以及钢纤维的有效利用率都会降低,同时存在一个最佳的粗骨料掺量(UHPC基体替代量 $\leq 25\%$),这与本文试验结果相近.

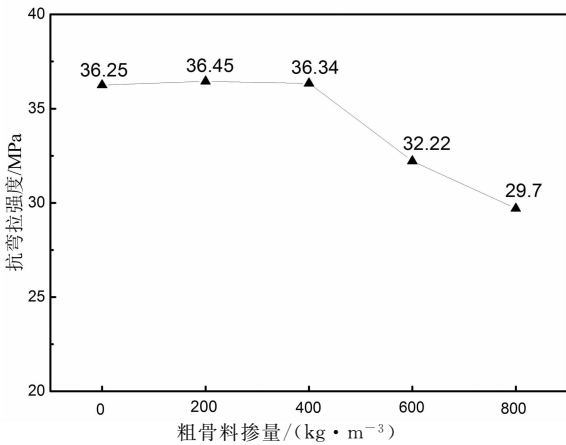


图10 不同粗骨料掺量UHPC抗弯拉强度
Fig. 10 Flexural strength of UHPC with different coarse aggregate content

图11为不同钢纤维长度UHPC抗弯拉强度图.从图11可以看出,粗骨料掺量为 600 kg/m^3 时,使用25 mm长纤维较13 mm短纤维对UHPC抗弯拉强度有显著的提升.根据纤维复合增强理论,纤维长径比越大,纤维对UHPC基体的抗弯拉强度增强作用效果越大.文献^[16]中也指出,在相同纤维掺量和满足相同工作性能时,长径比越大,纤维利用率越高,UHPC抗弯拉强度越大.

2.4 弯曲韧性

基于Naaman等^[17]对钢纤维混凝土荷载-挠度曲线的分类,将UHPC荷载-挠度曲线分为3个阶段:阶段I:弹性阶段,这一阶段荷载随位移的增加而线性增长,直至UHPC初裂;阶段II:应变硬化阶段,UHPC开裂后拉应力主要靠纤维与UHPC之

间的粘结作用承担,荷载随着位移增大呈非线性增加,主裂缝逐渐形成,直至荷载峰值;阶段III:应变软化阶段,随着UHPC裂缝扩张,钢纤维被逐渐拔出,荷载随着位移增大急剧下降,直至UHPC受弯折断.荷载-挠度曲线和坐标轴围成的面积为UHPC试件在弯拉过程中所消耗的能量.

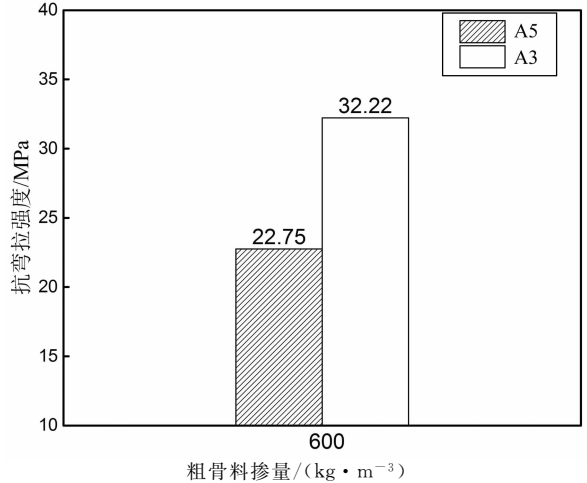


图11 不同钢纤维长度UHPC抗弯拉强度
Fig. 11 Flexural strength of UHPC with different steel fiber length

从图12和表7可以看出,随着粗骨料掺量增加,UHPC均存在应变硬化阶段,但是不同粗骨料掺量UHPC荷载-挠度曲线变化较大,说明粗骨料掺量对于UHPC的弯曲韧性影响显著;在粗骨料掺量不大于 400 kg/m^3 时,粗骨料掺量对UHPC初裂强度影响较小,但是粗骨料掺量继续增加,UHPC初裂强度下降明显;UHPC峰值强度随粗骨料掺量增加而逐渐减小,这与前述随着粗骨料掺量增加抗弯拉强度的变化规律不同,并且峰值强度与前述抗

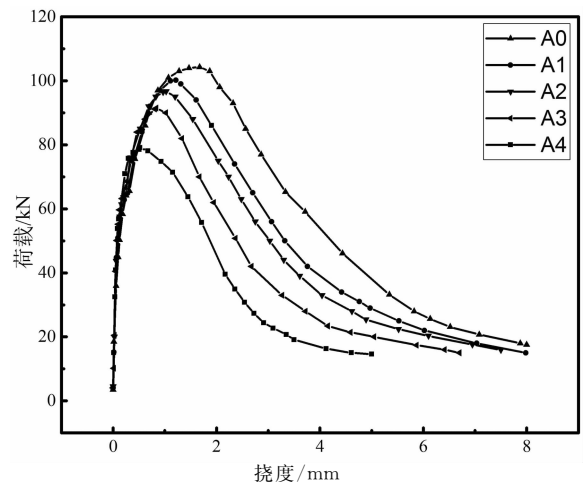


图12 不同粗骨料掺量UHPC荷载-挠度曲线
Fig. 12 Load-deflection curve of UHPC with different coarse aggregate content

弯拉强度相差较大,这是因为:抗弯拉强度测试采用力控制,而弯曲韧性测试采用 0.1 mm/min 位移控制,试验发现采用位移控制达到峰值的时间是采用力控制达到峰值所需时间的 5 倍左右,荷载传递速度差异较大。

随着粗骨料掺量增加,UHPC 的初裂挠度与峰值挠度逐渐减小.无粗骨料 UHPC 的初裂挠度是掺量分别为 200 kg/m³、400 kg/m³、600 kg/m³ 和 800 kg/m³粗骨料的 UHPC 初裂挠度的 1.13 倍、1.32 倍、1.82 倍和 2.62 倍;无粗骨料 UHPC 的峰值挠度是粗骨料掺量分别为 200 kg/m³、400 kg/m³、600 kg/m³ 和 800 kg/m³粗骨料的 UHPC 峰值挠度的 1.38 倍、1.63 倍、2.01 倍和 3.22 倍,可见随着粗骨料掺量增加,UHPC 的初裂挠度与峰值挠度都会不断下降。

随着粗骨料掺量增加,弯拉过程的弹性阶段、应变硬化阶段、应变软化阶段的弯拉耗能均不断下降。

表 7 不同粗骨料掺量及钢纤维长度对 UHPC 弯曲韧性的影响

Tab. 7 Influence of different coarse aggregate content on the flexural toughness of UHPC

编号	初裂强度 /MPa	初裂挠度 /mm	峰值强度 /MPa	峰值挠度 /mm	阶段 I 耗能/J	阶段 II 耗能/J	阶段 III 耗能/J
A0	19.85	0.315	32.20	1.675	15.68	128.94	303.05
A1	19.46	0.280	30.56	1.213	14.20	83.67	290.33
A2	19.43	0.238	29.50	1.027	11.80	68.30	273.75
A3	18.11	0.173	27.56	0.835	7.99	54.52	223.97
A4	17.12	0.120	23.73	0.521	4.87	29.18	158.46
A5	18.14	0.175	21.40	0.791	7.25	39.54	178.65

由表 7 和图 13 可知,随着钢纤维长度的增加,UHPC 的峰值强度、峰值挠度以及弯拉过程各阶段耗能均得到提高.这是因为在满足工作性能的条件

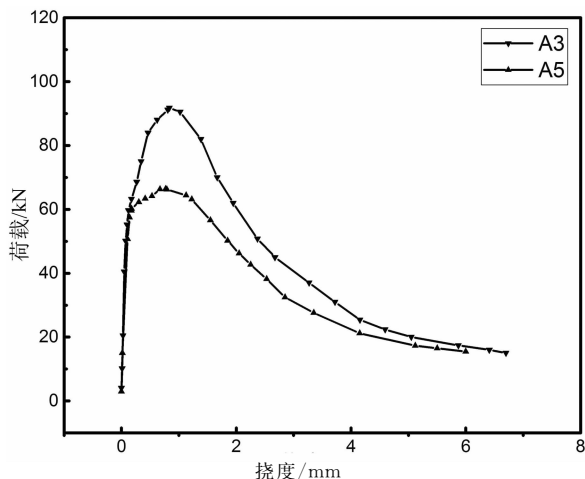


图 13 不同钢纤维长度 UHPC 荷载-挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curve of UHPC with different steel fiber length

弹性阶段无粗骨料 UHPC 耗能是掺量分别为 200 kg/m³、400 kg/m³、600 kg/m³ 和 800 kg/m³粗骨料 UHPC 耗能的 1.14 倍、1.32 倍、1.96 倍和 3.22 倍;应变硬化阶段无粗骨料 UHPC 耗能是掺量分别为 200 kg/m³、400 kg/m³、600 kg/m³ 和 800 kg/m³粗骨料的 UHPC 耗能的 1.54 倍、1.89 倍、2.36 倍和 4.42 倍;应变软化阶段无粗骨料 UHPC 耗能是掺量分别为 200 kg/m³、400 kg/m³、600 kg/m³ 和 800 kg/m³粗骨料 UHPC 耗能的 1.04 倍、1.11 倍、1.35 倍和 1.92 倍.这是因为粗骨料掺量少时,UHPC 基体较多,界面过渡区微裂缝少,刚性骨架和骨料咬合作用较强,钢纤维与 UHPC 基体之间的粘结力较大,纤维拔出耗能大;粗骨料掺量增加,界面过渡区微裂缝越多,钢纤维分布容易结团,纤维利用率下降,基体与钢纤维粘结作用越差,钢纤维拔出消耗能量越大。

下,长纤维的利用率更大,特别是在 UHPC 基体开裂以后,长纤维与 UHPC 基体之间的粘结作用以及长纤维对粗骨料的锚固作用更大.但是不同钢纤维长度对含粗骨料 UHPC 的初裂强度和初裂挠度影响较小,这是由于混凝土开裂时应变较小,在低应变的情况下,不同长度钢纤维与 UHPC 基体之间的粘结作用影响较小。

3 结 论

本文成功制备了具有优异力学性能含粗骨料的 UHPC,并通过试验研究了不同粗骨料掺量以及不同几何参数端钩型钢纤维对含粗骨料 UHPC 的力学性能的影响,得出以下主要结论:

1)当粗骨料掺量不大于 400 kg/m³时,粗骨料掺量的增加对 UHPC 抗压强度有增强效应,但是粗骨料掺量大于 400 kg/m³会造成 UHPC 抗压强度下降.对于含粗骨料 UHPC,长钢纤维对于 UHPC

抗压强度的增强贡献更大。

2) 粗骨料对 UHPC 的静力受压弹性模量增强效应显著,随着粗骨料掺量增加,UHPC 弹性模量几乎呈线性增长。但是钢纤维长度对于含粗骨料 UHPC 弹性模量影响较小。

3) 当粗骨料掺量在 $0 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 时,UHPC 抗弯拉强度和初裂强度变化较小;粗骨料掺量为 $400 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 时,UHPC 抗弯拉强度和初裂强度降低明显,长纤维对 UHPC 抗弯拉强度增强效应更好,而不同纤维长度对 UHPC 初裂强度影响较小。

4) 随着粗骨料掺量增加,UHPC 弯曲韧性变化显著,UHPC 弯曲韧性不断减小,初裂挠度,峰值挠度和峰值强度不断降低,但是均存在应变硬化过程。长钢纤维可以较大地提高含粗骨料 UHPC 的弯曲韧性、峰值强度和峰值挠度,但对初裂挠度影响较小。

参考文献

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] SEDRAN D L. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6): 997-1009.
- [3] WILLE K, NAAMAN A E, EL-TAWIL S, *et al.* Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing[J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 309-324.
- [4] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2002: 18-37.
SHAN B. Experimental study on basic mechanical property of reactive powder concrete[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2002: 18-37. (In Chinese)
- [5] 杨吴生, 黄政宇. 热养护对高性能混凝土强度的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(3): 150-153.
YANG W S, HUANG Z Y. Effects of thermal curing on the strength of high performance concrete[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2003, 30(3): 150-153. (In Chinese)
- [6] 邵旭东, 方恒, 李文光. 钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(5): 44-51.
SHAO X D, FANG H, LI W G. Research on the interfacial shear resistance performance of the composite deck system composed of orthotropic deck and ultra-thin UHPC layer[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2016, 43(5): 44-51. (In Chinese)
- [7] 邵旭东, 张哲, 刘梦麟, 等. 正交异性钢-RPC 组合桥面板弯拉强度的试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(10): 7-13.
SHAO X D, ZHANG Z, LIU M L, *et al.* Research on bending tensile strength for composite bridge deck system composed of orthotropic steel deck and thin RPC Topping[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2012, 39(10): 7-13. (In Chinese)
- [8] 刘娟红, 宋少民. 活性粉末混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 3-13.
LIU J H, SONG S M. Reactive powder concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 3-13. (In Chinese)
- [9] 冯浩. 超高性能混凝土早期塑性收缩开裂的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2014: 31-40.
FENG H. Study on the early stage plastic shrinkage and cracking performance of ultra high performance concrete[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2014: 31-40. (In Chinese)
- [10] 李伯勋. 低成本环保型超高性能混凝土的配制研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2009: 8-9.
LI B X. The research on preparation of environmentally friendly ultra high performance concrete with low cost [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2009: 8-9. (In Chinese)
- [11] MO A, EL-TAWIL S. Effects of variations in the mix constituents of ultra high performance concrete (UHPC) on cost and performance[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(10): 4185-4200.
- [12] 易伟建, 王昱, 邓清. 骨料粒径对无腹筋梁抗剪性能影响的试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(11): 1-7.
YI W J, WANG Y, DENG Q. Experimental study on aggregate size role in shear strength of reinforced concrete beams without shear reinforcement[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2014, 41(11): 1-7. (In Chinese)
- [13] HOANG K H, HADL P, TUE N V. A new mix design method for UHPC based on stepwise optimization of particle packing density[C] // *International Interactive Symposium on UHPC*. Des Moines, Iowa: Iowa Press, 2016: 87-95.
- [14] YANG J, PENG G F, GAO Y X, *et al.* Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete incorporating coarse aggregate[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 629/630: 96-103.
- [15] 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.
- [16] 高绪明. 钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2013: 40-48.
GAO X M. Studies on the effect of steel fiber on the performance of ultra high performance concrete[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2013: 40-48. (In Chinese)
- [17] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response[J]. *Materials and Structures*, 2006, 39: 547-555.