

含粗骨料超高性能混凝土弯拉强度尺寸效应

苏 捷^{1,2}, 史才军^{1,2}, 鲁飞扬¹, 方 志¹

(1. 湖南大学绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082;

2. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 制备不同粗骨料含量、水胶比、钢纤维含量的超高性能混凝土(UHPC)棱柱体试件, 分析了粗骨料含量、水胶比和钢纤维体积掺量等对 UHPC 弯拉强度及尺寸效应的影响。结果表明: 含粗骨料 UHPC 的弯拉强度随水胶比和粗骨料含量的提高呈下降趋势。随粗骨料含量的提高, UHPC 弯拉强度尺寸效应趋于显著。含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应随水胶比的提高而逐渐减弱。建议了含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数, 提出了尺寸效应律参数计算公式, 可预测含粗骨料 UHPC 的弯拉强度。

关键词: 超高性能混凝土; 粗骨料; 弯拉强度; 尺寸效应; 水胶比; 钢纤维

中图分类号: TU5 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0438-07

网络出版时间: 2022-01-20



Scale Effect of Coarse Aggregate Content on Flexural Tensile Strength of Ultra-High Performance Concrete

SU Jie^{1,2}, SHI Caijun^{1,2}, LU Feiyang¹, FANG Zhi¹

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Ultra-high performance concrete (UHPC) prismatic specimen with different water-binder ratios, coarse aggregate contents, steel fiber volume fractions, and specimen dimensions were prepared. The influences of water-binder ratio, coarse aggregate content and steel fiber volume fraction as well as the scale effect on the flexural tensile strength of UHPC containing coarse aggregate were investigated. The results show that the flexural tensile strength of UHPC containing coarse aggregate decreases with the increase of the water-binder ratio and the coarse aggregate content. The scale effect on the flexural tensile strength of UHPC containing coarse aggregate is greater than that of UHPC without coarse aggregate. The scale effect on the flexural tensile strength of UHPC containing coarse aggregate decreases gradually with the increase of water-binder ratio. The scale conversion coefficient of flexural tensile strength of UHPC containing coarse aggregate and the parameter calculation formula of scale effect law were proposed for predicting the flexural tensile strength of UHPC with coarse aggregate.

Keywords: ultra-high performance concrete; coarse aggregate; flexural tensile strength; scale effect; water-binder ratio; steel fiber

超高性能混凝土(UHPC)^[1-2]是一种新型水泥基复合材料^[3], 具有超高强度、韧性和优良的耐久性等优点, 在土木工程中极具应用前景。目前 UHPC 多以水泥、硅灰、粉煤灰及矿渣为胶凝材料和掺合料, 以石英砂或河沙作为细骨料配制。UHPC 配合比中胶凝材料用量较高, 材料早期收缩大, 影响耐

久性^[4]。此外, 较高的胶凝材料用量导致材料造价高昂, 极大限制了 UHPC 在土木工程中的推广应用。在 UHPC 适量掺入粗骨料可有效减少胶凝材料用量, 减小材料早期收缩, 大幅降低材料造价。朋改非^[5]、史才军^[6]、黄维蓉^[7]和黄政宇等^[8]在对不同粗骨料含量、钢纤维类型和体积掺量的 UHPC 进行试验研究

收稿日期: 2021-04-30。 修订日期: 2021-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408213); 国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)。

第一作者: 苏 捷(1979—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2021-04-30. Revised date: 2021-10-26.

First author: SU Jie (1979—), male, Ph. D, Associate Professor.

E-mail: iamsujie@163.com

基础上,提出了含粗骨料 UHPC 配制技术,分析了粗骨料和钢纤维对 UHPC 受压和受拉性能的影响。

作为一种超高性能水泥基材料,UHPC 具有较强尺寸效应特征^[9-10],表现为材料强度随试件或构件尺寸增大而降低。近年来研究者们对不含粗骨料 UHPC 弯拉强度及弯曲韧性尺寸效应开展了一些研究。苏捷^[9-10]、罗晨熙^[11]、REINECK^[12-13]、YANG^[14]和安明喆等^[15]进行了强度等级为 R100 级至 R160 级,掺入 0 至 3%端勾形和平直形钢纤维 UHPC 的弯拉性能及弯曲韧性尺寸效应试验,分析了强度等级、纤维类型和体积掺量等因素对不含粗骨料 UHPC 弯拉性能和弯曲韧性尺寸效应的影响,提出截面边长 150 mm UHPC 棱柱体试件弯拉强度仅约为截面边长 100 mm 的 70%。统计尺寸效应理论认为材料内部组成的非均质性是导致尺寸效应的主要原因。不含粗骨料 UHPC 由水泥砂浆基体组成,材料均质性较好。含粗骨料 UHPC 内除水泥砂浆基体外还存在粗骨料和粗骨料-基体间的粘结界面层,具有较强的非均质性。文献[16]研究成果表明粘结界面层是混凝土尺寸效应的控制性影响因素,因此,可以推断含粗骨料 UHPC 弯拉强度的尺寸效应将强于不含粗骨料的 UHPC。

国内外在弯拉强度尺寸效应试验研究基础上,初步建立了不含粗骨料 UHPC 弯拉强度的尺寸效应律^[10,15]。粗骨料含量对 UHPC 弯拉性能及尺寸效应影响较大,迄今对含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应研究未见文献报道。因此,本工作中以水胶比、粗骨料含量和钢纤维体积掺量为试验参数,对 UHPC 弯拉性能及尺寸效应进行较系统的试验研究,分析水胶比、粗骨料含量和钢纤维体积掺量对

含粗骨料 UHPC 弯拉性能及尺寸效应的影响,建立含粗骨料 UHPC 弯拉强度的尺寸效应律。

1 实验

1.1 原材料

水泥为 P.O.52.5 硅酸盐水泥;硅灰 SiO₂ 含量(质量分数)95.4%,平均粒径为 0.1 μm;超细粉煤灰 SiO₂ 含量 57.3%,比表面积 689 m²/kg;超细矿渣粉比表面积 824 m²/kg;细骨料采用最大粒径 1.25 mm 的天然河沙,细度模数为 2.3;石英粉为 325 目磨细石英粉;粗骨料为最大粒径 10 mm 的玄武岩碎石;减水剂为聚羧酸类高效减水剂;钢纤维采用长径比 65 的端钩形钢纤维,纤维长度 13 mm,等效直径 0.2 mm。

1.2 试件设计

UHPC 采用 3 个水胶比(0.16、0.18 和 0.20)。每水胶比下设计 4 种不同粗骨料含量,分别为 0、200、400 kg/m³ 和 600 kg/m³。为分析钢纤维体积掺量对含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应的影响,按水胶比 0.18 采用 400 kg/m³ 粗骨料,制备体积掺量(ρ_f)为 0、1%、2%和 3%的 UHPC 棱柱体试件。为研究尺寸效应的影响,UHPC 棱柱体试件采用 3 个尺寸,分别为 70 mm×70 mm×310 mm、100 mm×100 mm×400 mm 和 150 mm×150 mm×550 mm。UHPC 试件总计 45 个规格,每种规格制备 12 个试件。

1.3 配合比

UHPC 配合比如表 1 所示。分别以 A3、B3 和 C3 配合比各制备了 3 块边长 100 mm 立方体试件以确定 UHPC 强度,实测抗压强度分别为 178.6 MPa、159.8 MPa 和 137.9 MPa。

表 1 超高性能混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of UHPC

Sample No.	Mass fraction w /%						w (Water reducer)/%	Water-binder ratio r	Volume fraction ϕ (Fiber)/%	ρ (Coarse aggregate) / (kg·m ⁻³)
	Cement	Silica fume	Fly ash	Slag	Sand	Quartz powder				
A1	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	0
A2	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	200
A3	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	400
A4	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	600
B1	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	0
B2	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	200
B3	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	400
B4	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	600
C1	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	0
C2	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	200
C3	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	400
C4	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	600
D1	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	0	400
D2	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	1	400
D3	1.0	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	3	400

1.4 试件制备及测试

将水泥、硅灰、粉煤灰、矿渣、细骨料和粉末状减水剂投入强制式搅拌机干拌 5 min, 至粉体材料搅拌均匀; 加入粗骨料后干拌 3 min。加入水后湿拌 5 min, 至 UHPC 呈完全流态。最后加入钢纤维, 继续搅拌 5 min。搅拌完毕后立即将 UHPC 装入钢模, 并振动成型。

UHPC 养护按活性粉末混凝土规范 GB/T31387^[17] 进行升温养护。依据超高性能混凝土基本性能与试验方法 T/CBMF37^[18] 在 TP1000 型万能试验机上采用三分点加载进行 UHPC 弯拉试验, 截面边长 70 mm、100 mm 和 150 mm 试件三分点加载跨距分别为 70 mm、100 mm 和 150 mm, 加载速率为 0.1 MPa/s。结果为 12 个 UHPC 棱柱体试件弯拉强度的平均值。

2 结果与讨论

2.1 含粗骨料 UHPC 的弯拉强度

图 1 为实测 UHPC 棱柱体试件弯拉强度值。由

图 1 可知: 粗骨料含量对 UHPC 弯拉强度有一定影响, 弯拉强度随粗骨料含量的增大逐渐降低, 水胶比为 0.16、0.18 和 0.20 下, 不含粗骨料 UHPC 标准试件弯拉强度分别约为含 200 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 115%、112% 和 111%, 分别为含 400 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 131%、126% 和 123%, 分别为含 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 142%、137% 和 132%。

随水胶比的增大, 含粗骨料 UHPC 棱柱体试件弯拉强度逐渐减小, 水胶比 0.18 和 0.20 时含粗骨料 UHPC 标准棱柱体试件弯拉强度分别约为水胶比 0.16 含粗骨料 UHPC 的 84% 和 75%。

随钢纤维体积掺量的提高, 含粗骨料 UHPC 的弯拉强度呈增大趋势。钢纤维体积掺量为 1%、2% 和 3% 时标准棱柱体试件弯拉强度分别为未掺入钢纤维 UHPC 的 1.21 倍、1.46 倍和 1.61 倍。

由图 1 可知, 含粗骨料 UHPC 弯拉强度随测试试件截面边长的增大而明显减小, 具有较明显的尺寸效应。

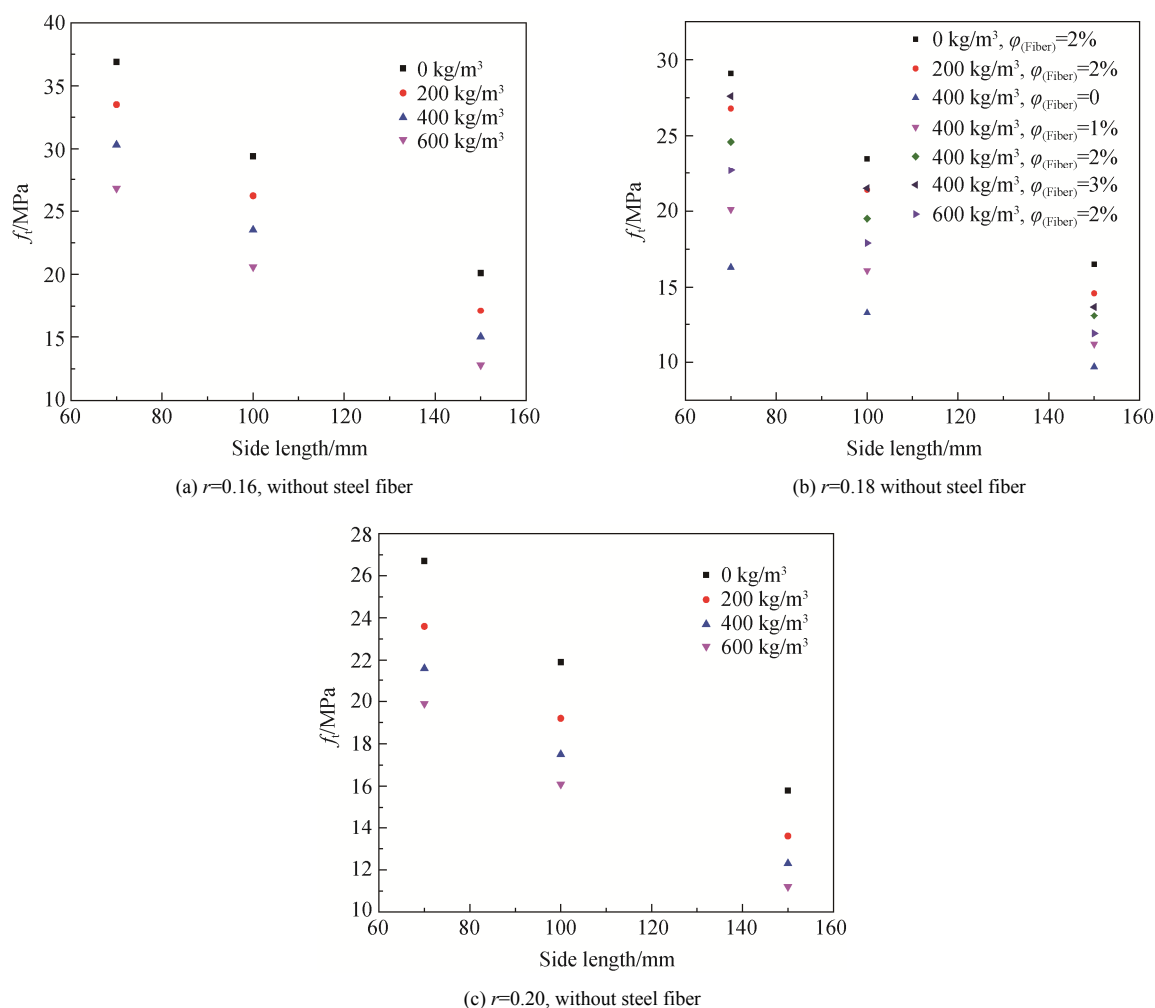


图 1 不同粗骨料含量下 UHPC 弯拉强度实测值

Fig. 1 Flexural tensile strengths (f_t) of UHPC containing coarse aggregate

2.2 尺寸效应

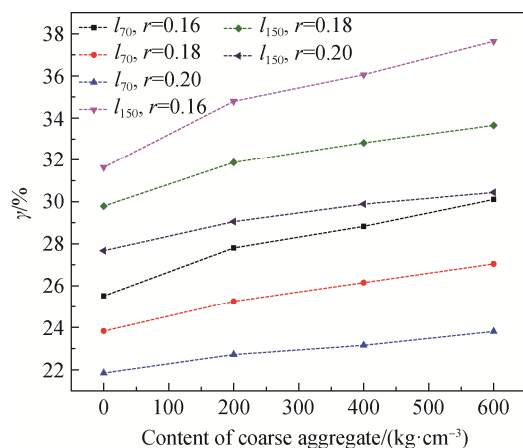
2.2.1 粗骨料含量对尺寸效应的影响 以截面边长 70 mm 和 150 mm UHPC 棱柱体试件和截面边长 100 mm 标准试件^[17-18]间弯拉强度差值占标准试件弯拉强度的百分比为尺寸效应度^[10], 以尺寸效应度对尺寸效应进行定量描述。弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 和 γ_{150} 分别按式(1)和式(2)计算:

$$\gamma_{70} = \frac{|f_{f,70} - f_{f,100}|}{f_{f,100}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma_{150} = \frac{|f_{f,150} - f_{f,100}|}{f_{f,100}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $f_{f,70}$ 、 $f_{f,100}$ 和 $f_{f,150}$ 依次为截面边长 70 mm、100 mm 和 150 mm UHPC 棱柱体试件的弯拉强度值, MPa。

根据实测结果, 计算得到钢纤维体积掺量 2% 时不同粗骨料含量 UHPC 棱柱体试件弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 和 γ_{150} 如图 2 所示。



l is length of cross section.

图 2 钢纤维掺量为 2% 的不同粗骨料含量 UHPC 弯拉强度尺寸效应度

Fig. 2 Scale effect parameter of UHPC containing different content of coarse aggregate with 2% steel fiber

由图 2 可知: UHPC 棱柱体试件弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 和 γ_{150} 随粗骨料含量提高而明显增大, 尺寸效应趋于显著。水胶比 0.16、0.18 和 0.20 下, 含 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 分别为不含粗骨料 UHPC 的 118%、113% 和 109%, 分别为含 200 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 108%、107% 和 105%; 含 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度 γ_{150} 分别为不含粗骨料 UHPC 的 120%、113% 和 110%, 分别为含 200 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 108%、106% 和 105%。

根据统计尺寸效应理论, 尺寸效应由材料内部低

强度单元概率引发。大尺寸试件含低强度单元概率较高, 使得其抗折强度值低于小尺寸试件。文献[16]的研究成果表明, 粗骨料-水泥砂浆基体间粘结界面层强度明显低于粗骨料和水泥砂浆基体, 且强度的离散性较大, 是影响尺寸效应的主要因素。不含粗骨料的 UHPC 由水泥砂浆基体和钢纤维组成, 内部材料均质性较强。掺入粗骨料后, UHPC 材料内增加了粗骨料和粗骨料-水泥砂浆粘结界面, 粘结界面的强度相对基体明显偏低, 增强了材料弯拉强度的尺寸效应。

2.2.2 水胶比对尺寸效应的影响 根据 3 个水胶比下含粗骨料 UHPC 弯拉试验的实测结果, 计算得到弯拉强度尺寸效应度 γ 值, 如图 3 所示。

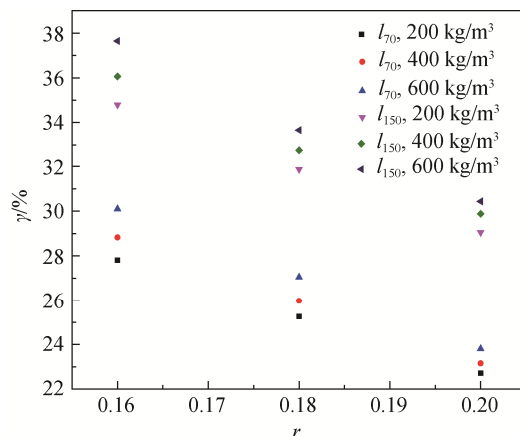


图 3 弯拉强度尺寸效应度 γ

Fig. 3 Scale effect parameter γ

由图 3 可知: 随水胶比的增大, 含粗骨料 UHPC 棱柱体试件弯拉强度尺寸效应度 γ 逐渐降低。水胶比 0.16 下, 含 200、400 kg/m³ 和 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 分别为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 1.22 倍、1.24 倍和 1.26 倍, 弯拉强度尺寸效应 γ_{150} 依次为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 1.19 倍、1.21 倍与 1.24 倍。

低水胶比 UHPC 材料的流动性相对较差, 浇筑时内部含有气泡等缺陷较多。此外, 水胶比较低时 UHPC 中胶凝材料较多, 导致水化热较高, 大尺寸试件内温度梯度较大, 引发温致裂纹。这些气泡和微裂纹等缺陷在试件内形成低强度单元, 使得低水胶比试件具有较强的尺寸效应特征。

2.2.3 钢纤维掺量对尺寸效应的影响 在水胶比 0.18 和含 400 kg/m³ 粗骨料下, 4 种钢纤维体积掺量 UHPC 棱柱体试件弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 和 γ_{150} 如图 4 所示。

由图 4 可知: 含粗骨料 UHPC 棱柱体试件弯拉

强度尺寸效应随钢纤维体积掺量的增大而显著提高。钢纤维体积掺量 3% 下, 含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度 γ_{70} 和 γ_{150} 分别为不含钢纤维 UHPC 的 125% 和 134%, 分别为含 1% 钢纤维 UHPC 的 115% 和 121%。这与文献[10–11]关于不含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应结论一致。

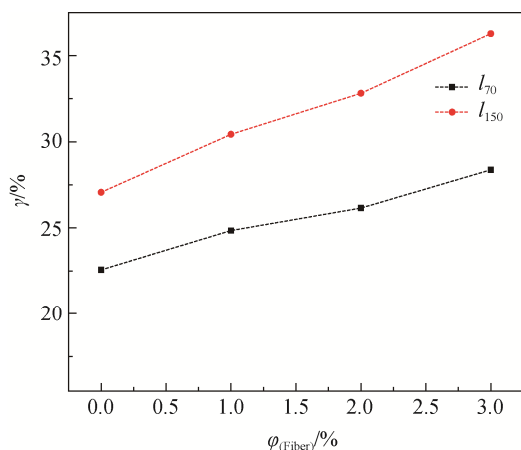
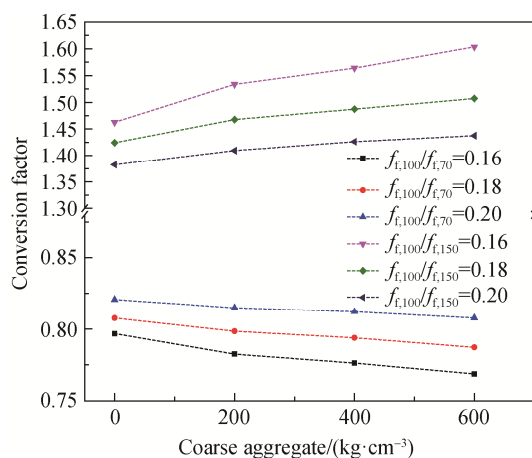
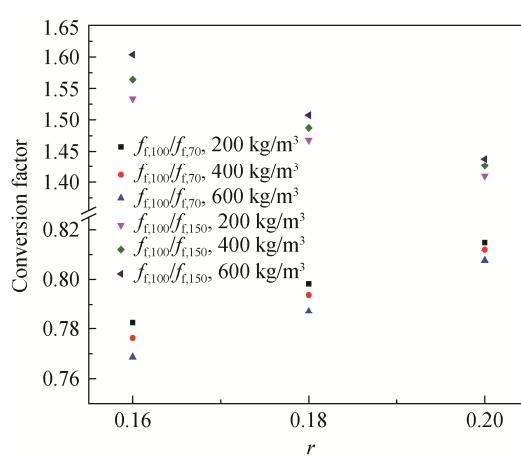


图4 不同钢纤维掺量下含粗骨料UHPC弯拉强度尺寸效应度
Fig. 4 Scale effect parameter of UHPC containing coarse aggregate with different volume fraction of steel fiber

UHPC 试件浇筑成型过程中, 钢纤维受到试模的影响, 在表面附近区域分布模式发生改变, 多为



(a) Coarse aggregate content



(b) Water-binder ratio

图5 钢纤维掺量 2% 的试样弯拉强度尺寸换算系数

Fig. 5 Conversion factors for flexural tensile strengths of specimens with 2% steel fiber

由图 5a 可知: 随粗骨料含量的提高, 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,70}$ 逐渐减小, $f_{t,100}/f_{t,150}$ 逐渐增大, 尺寸换算系数值逐渐偏离 1, 表明尺寸效应随粗骨料含量增大呈增强趋势。水胶比 0.18 时, 粗骨料含量 600 kg/m^3 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,70}$ 和 $f_{t,100}/f_{t,150}$ 分别约为不含粗骨料 UHPC 的 96% 和 106%。

由图 5b 可知: 随水胶比的增大, 含粗骨料 UHPC

与试件表面平行方向分布, 对内部 UHPC 形成约束作用, 即边壁效应^[10]。小尺寸试件表面积与体积之比较大, 边壁效应的约束较大尺寸试件更强, 因此尺寸效应更显著。

2.2.4 尺寸换算系数分析 在我国现行规范规程体系框架下, 尺寸换算系数是尺寸效应分析的主要指标。混凝土规范 GB/T50081^[19]定义弯拉强度尺寸换算系数为标准试件(截面边长 150 mm 棱柱体试件)弯拉强度与非标准试件(截面边长 100 mm 棱柱体试件)弯拉强度之比, 通过尺寸换算系数将不同尺寸试件弯拉强度进行折算。活性粉末混凝土规范 GB/T31387^[17]和超高性能混凝土基本性能与试验方法 T/CBMF37^[18]中规定 UHPC 弯拉强度测试采用截面边长 100 mm 的标准试件, 且弯拉强度试验值不应乘以尺寸换算系数^[17–18]。结合我国工程建设实际情况, 在 UHPC 强度较高时, 常用试验机可能出现加载吨位不足的问题。因此, 提出适用于 UHPC 材料的尺寸换算系数具有工程意义。按照 UHPC 材料规范^[17–18], 以截面边长 100 mm 试件为标准试件, 计算得到 2% 钢纤维体积掺量下 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,70}$ 和 $f_{t,100}/f_{t,150}$, 如图 5 所示。

弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,70}$ 逐渐降低, $f_{t,100}/f_{t,150}$ 逐渐减小, 弯拉强度尺寸换算系数值趋近于 1, 表明弯拉强度尺寸效应随水胶比增大呈减弱趋势。水胶比 0.16 和 0.18 时, 含 400 kg/m^3 粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,70}$ 约为水胶比 0.20 时相同粗骨料含量 UHPC 的 95% 和 97%, 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t,100}/f_{t,150}$ 约为水胶比 0.20 下 UHPC 的 110% 和 105%。

收集整理国内外含粗骨料 UHPC 弯拉试验研究成果^[7-8], 结合弯拉强度试验数据, 对弯拉强度尺寸换算系数进行修正, 修正后含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t, 100}/f_{t, 70}$ 可取为 0.789, 尺寸换算系数 $f_{t, 100}/f_{t, 150}$ 可取为 1.517。分析采用的含粗骨料 UHPC 试件总计 105 组, 边长范围为 70 mm 至 150 mm, 粗骨料含量为 200 kg/m³ 至 800 kg/m³, 钢纤维体积掺量为 0 至 3%。经统计分析, 尺寸换算系数方差范围为 0.02 至 0.08, 变异系数范围为 1.3% 至 3.9%。

3 尺寸效应律分析

Bazant 基于混凝土断裂力学理论对尺寸效应进行分析, 认为材料尺寸效应因主裂纹或主裂纹带发展时释放断裂能引发, 提出了适用于无切口试件的名义强度 σ_N 与试件尺寸 D 分析公式^[20]:

$$\sigma_N = \sigma_\infty \left(1 + \frac{D_b}{D} \right) \quad (3)$$

其中: σ_∞ 为试件尺寸无穷大下材料的特征强度, MPa; D_b 为材料的特征尺寸, mm。

文献[10]研究成果表明式(3)对不含粗骨料 UHPC 弯拉强度分析具有良好的适用性, 为检验式(3)对含粗骨料 UHPC 弯拉强度分析的适用性, 采用国内关于含粗骨料 UHPC 弯拉试验^[4-10]和本试验结果, 样本包含 160 组水胶比为 0.16 至 0.20, 粗骨料含量为 0 至 800 kg/m³, 钢纤维掺量范围为 0 至 3%, 截面边长为 70 mm 至 150 mm UHPC 棱柱体试件弯拉强度数据拟合式(3)。

通过参数分析, 得到各水胶比和粗骨料含量下 UHPC 弯拉强度尺寸效应律计算式(3)中特征强度 σ_∞ 和特征尺寸 D_b , 列于表 3。文献[4-10]弯拉强度试验结果与尺寸效应律式(3)分析结果的相关系数为 0.932, 表明吻合良好。

表 3 尺寸效应公式参数值
Table 3 Parameters in the scale effect law

Content of coarse aggregate (kg·m ⁻³)	σ_∞ /MPa			D_b /mm		
	$r=0.16$	$r=0.18$	$r=0.20$	$r=0.16$	$r=0.18$	$r=0.20$
0	6.3	6.1	6.9	4	8	6
200	3.6	4.6	5.4	8	4	8
400	2.4	3.6	4.7	6	7	9
600	1.3	3.1	4.1	4	1	3

分析表 3 中数据, 建立式(3)中特征强度 σ_∞ 及特征尺寸 D_b 与水胶比及粗骨料含量的关系, 如式(4)和式(5)。式(4)和式(5)对特征强度 σ_∞ 和特征尺寸 D_b

的计算结果与表 3 数据的相关系数分别为 0.913 和 0.939, 表明吻合良好, 可按式(4)和式(5)对不同粗骨料含量与水胶比下 UHPC 弯拉强度的特征强度 σ_∞ 和特征尺寸 D_b 进行估算。

$$\sigma_\infty = 20.25r - 0.02R + 0.09Rr + 2.46 \quad (4)$$

$$D_b = -1760r + 7.74R - 39.58Rr + 572.32 \quad (5)$$

式中: r 为水胶比; R 为粗骨料含量, kg/m³。

4 结论

1) 随水胶比和粗骨料含量的提高, 含粗骨料 UHPC 弯拉强度呈减小趋势。水胶比 0.18 和 0.20 时含粗骨料 UHPC 弯拉强度分别约为水胶比 0.16 时含粗骨料 UHPC 的 84% 和 75%。不含粗骨料 UHPC 弯拉强度约为含 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 的 130%。

2) 粗骨料含量对 UHPC 弯拉强度尺寸效应影响较大, 含 600 kg/m³ 粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度约为不含粗骨料 UHPC 的 1.2 倍。

3) 随水胶比的提高, 含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应逐渐减弱。水胶比 0.16 时含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度约为水胶比 0.20 时 UHPC 的 1.24 倍。

4) 含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应随钢纤维体积掺量的增大而显著提高, 钢纤维体积掺量 3% 下含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸效应度约为不掺钢纤维 UHPC 的 1.34 倍。

5) 含粗骨料 UHPC 弯拉强度尺寸换算系数 $f_{t, 100}/f_{t, 70}$ 可取为 0.789, 尺寸换算系数 $f_{t, 100}/f_{t, 150}$ 可取为 1.517。

6) 提出了尺寸效应律参数计算公式, 可预测含粗骨料 UHPC 的弯拉强度。

参考文献:

- [1] LARRARD F D, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res, 1994, 24(6): 997-1009.
- [2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [3] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength[J]. ACI Spec Publ 1994, 144(24): 507-518.
- [4] 余自若, 王博亨, 安明喆. 超高性能纤维增强混凝土板的受弯试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 49(9): 131-139.
YU Ziruo, WANG Boheng, AN Mingzhe. J Build Struct(in Chinese), 2019, 49(9): 131-139.
- [5] 朋改非, 腾岩, 黄艳竹, 等. 含粗骨料超高性能混凝土火灾高温性能研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(1): 1-6.
PENG Gaifei, TENG Yan, HUANG Yanzhu, et al. J North China Univ Water Resour Elctro Power(in Chinese), 2013, 34(1): 1-6.

- [6] 欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 296–304.
OUYANG Xue, SHI Caijun, SHI Jinhua, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 49(2): 296–304.
- [7] 黄维蓉, 杨玉柱, 刘延杰, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1747–1755.
HUANG Weirong, YANG Yuzhu, LIU Yanjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1747–1755.
- [8] 黄政宇, 李仕根. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 47–54.
HUANG Zhengyu, LI Shigen. J. Hunan Univ: Nat Sci Ed(in Chinese), 2018, 45(3): 47–54.
- [9] 苏捷, 刘伟, 史才军, 等. 超高性能混凝土立方体抗压强度尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 305–311.
SU Jie, LIU Wei, SHI Caijun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 305–311.
- [10] 苏捷, 史才军, 秦红杰, 等. 超高性能混凝土抗折强度尺寸效应[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11): 1740–1746.
SU Jie, SHI Caijun, QIN Hongjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1740–1746.
- [11] 罗晨熙. 超高性能混凝土基本力学性能的尺寸效应研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2018: 18–24.
LUO Chenxi. Study on size effect of basic mechanical properties of ultra-high performance concrete (Dissertation, in Chinese). Changsha: Hunan University, 2018: 18–24.
- [12] REINECK K H, FRETTLORH B. Tests on scale effect of UHPFRC under bending and axial forces[J]. Constr Build Mater, 2016, 142(5): 781–790.
- [13] NGUYEN D L, REINECK K H, RYU G S. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete[J]. ACI Mater J, 2013, 45(1): 1104–1116.
- [14] MALMUD G M, YANG Z, HASSAN A M. Experimental and numerical studies of size effects of ultra high performance steel fiber reinforced concrete beams[J]. Constr Build Mater, 2013, 48(19): 1027–1034.
- [15] 安明喆, 张立军. RPC 材料的抗折强度尺寸效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 38–42.
AN Mingzhe, ZHANG Lijun. J China Univ Mining Technol(in Chinese), 2007, 36(1): 38–42.
- [16] 苏捷, 方志. 不同骨料组分混凝土立方体抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 152–157.
SU Jie, FANG Zhi. J Build Struct (in Chinese), 2014, 35(2): 152–157.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Chinese Standard-GB/T 31387-2015. Reactive powder concrete[S]. P. R. China, 2015.
- [18] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF37-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
China Building Material Federation, China Concrete & Cement-based Products Association. Chinese Standard- T/CBMF37-2018. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete[S]. P. R. China, 2019.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Chinese Standard-GB/T 50081-2019. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. P. R. China, 2019.
- [20] BAZANT Z P. Size effect[J]. Int J Solids Struct, 2000, 37(1/2): 69–80.