第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210401

粗骨料含量对超高性能混凝土抗压强度尺寸效应的影响

苏 捷[1,2,3]，史才军[1,2,3]，黄泽恩[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. 建筑安全与节能教育部重点实验室/湖南大学，长沙 410082；3. 湖南大学土木工程学院，长沙 410082)

摘 要：完成了 4 组粗骨料含量，3 个水胶比和 4 个几何尺寸含粗骨料超高性能混凝土(UHPC)立方体试件的抗压强度试验，分析了粗骨料含量和水胶比等对含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应的影响，结果表明：粗骨料含量对 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应影响较大，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度约为不含粗骨料 UHPC 的 1.39 倍。随水胶比的提高，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应逐渐减弱。建议了含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数，提出了尺寸效应律参数计算公式，可预测含粗骨料 UHPC 的立方体抗压强度。

关键词：超高性能混凝土；粗骨料；立方体抗压强度；尺寸效应；水胶比；钢纤维
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2416–07
网络出版时间：2021–10–12



Scale Effect on Cubic Compressive Strength on Ultra-High Performance Concrete Containing Coarse Aggregate

SU Jie[1,2,3], *SHI Caijun*[1,2,3], *HUANG Zeen*[1], *FANG Zhi*[1]

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The scale effect on the cubic compressive strength of ultra-high performance concrete (UHPC) containing coarse aggregate with respect to the influences of coarse aggregate content and water-binder ratio was investigated *via* the uniaxial compressive tests. The results show that the coarse aggregate content has an influence on the scale effect of UHPC containing coarse aggregate. The scale effect degree of UHPC containing coarse aggregate is approximately 1.39 times as that of UHPC without coarse aggregate. The scale effect on cubic compressive strength of UHPC containing coarse aggregate decreases gradually with the increase of water-binder ratio. The scale conversion coefficient of cubic compressive strength of UHPC containing coarse aggregate was given. The parameter calculation formula of scale effect law was proposed, which could predict the cubic compressive strength of UHPC with coarse aggregate.

Keywords: ultra-high performance concrete; coarse aggregate; cubic compressive 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]，具有超高的强度、韧性及优越的耐久性等优点，在土木工程中极具应用前景。当前国内外 UHPC 通常不含粗骨料，以水泥、硅灰、粉煤灰及矿渣等为胶凝材料和掺合料，以石英砂或河砂为细骨料进行配制，材料早期收缩较大[4]，弹性模量难以有效提高。为解决 UHPC 材料中所存在的上述问题，朋改非等[5]和史才军等[6]提出通过在 UHPC 中掺入适量粗骨料从而有效提高材料的抗压强度和弹性模量，并大幅降低材料的早期收缩。目前国

收稿日期：2021–05–19。　修订日期：2021–06–30。
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: 2021–05–19.　**Revised date:** 2021–06–30.
First author: SU Jie (1979–), male, Ph. D, Associate Professor.
E-mail: iamsujie@163.com

内外在含粗骨料 UHPC 受力性能方面开展了一些研究[5–8]，提出了粗骨料含量及钢纤维掺量等关键因素对 UHPC 受力性能影响的规律。

统计尺寸效应理论指出尺寸效应是非均质材料的固有特征，文献[9–13]研究成果表明不含粗骨料 UHPC 的抗压与抗拉强度均具有较强的尺寸效应。苏捷等[14–15]关于骨料组分与混凝土尺寸效应关系的研究成果表明，随粗骨料含量的增大，尺寸效应趋于显著。因此，根据统计尺寸效应理论，结合混凝土及 UHPC 尺寸效应研究成果[9–16]，粗骨料含量将对 UHPC 的尺寸效应产生较大影响。

国内外学者在试验研究基础上，初步建立了不含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应律。然而粗骨料对 UHPC 受压性能及尺寸效应影响较大，迄今对含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应研究未见文献报道。因此，本研究以粗骨料含量、水胶比和钢纤维体积掺量及试件尺寸为试验参数，对 UHPC 受压性能及尺寸效应进行较系统的试验研究，分析各因素对尺寸效应的影响，建立含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应律。

1　实验

1.1　原材料

制备 UHPC 主要原材料为：P·O52.5 硅酸盐水泥作为基准水泥；硅灰的平均粒径为 0.1 μm，比表面积为 18 500 m^2/kg，SiO_2 含量为 95.4%；超细粉煤灰为 I 级粉煤灰，SiO_2 含量为 57.3%，比表面积为 689 m^2/kg；超细矿渣粉 7d 活性指数为 120%，28 d 活性指数为 150%，比表面积为 824 m^2/kg；选用最大粒径为 5 mm 的天然河砂作为细骨料，天然河砂细度模数为 2.3；石英粉选用平均粒径 50 μm 的精磨石英粉；粗骨料选用玄武岩碎石，骨料最大粒径为 10 mm，实测压碎指标为 4.8；选用高效聚羧酸减水剂，减水率为 35%；钢纤维选取了长度为 13 mm，直径为 0.2 mm 的端钩形钢纤维，长径比为 65。

1.2　试件制备

设计 UHPC 采用 3 个水胶比(0.16、0.18 和 0.20)以分析水胶比对 UHPC 立方体强度及尺寸效应的影响。为分析粗骨料含量的影响，每水胶比下设计 4 种不同粗骨料含量，分别为 0、200、400 kg/m^3 和 600 kg/m^3。钢纤维体积掺量对 UHPC 立方体抗压强度有一定影响，在水胶比 0.18 下采用 400 kg 粗骨料，制备体积掺量(φ_f)为 0、1%、2%和 3%的 UHPC 立方体试件。

为研究含粗骨料 UHPC 的尺寸效应，在每一水胶比、粗骨料含量和钢纤维掺量下制备 4 个尺寸的 UHPC 方体试件，试件边长分别为 70、100、150 mm 和 200 mm。UHPC 试件总计 60 个规格，每规格制备 12 个试件，总计成型 720 个立方体试件。

1.3　配合比

UHPC 配合比如表 1 所示。试件制备步骤为：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

表 1　UHPC 配合比

Table 1　Mix proportion of UHPC

Sample No.	Mass ratio						w(Water)/ %	Water-binder ratio (r)	φ(Fiber)/ %	Content of aggregate/ (kg·m^{-3})	Slump flow/mm
	Cement	Silica fume	Fly ash	Slag	Sand	Quartz powder					
A1	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	0	530
A2	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	200	500
A3	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	400	490
A4	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.16	2	600	440
B1	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	0	590
B2	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	200	560
B3	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	400	540
B4	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	2	600	480
C1	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	0	710
C2	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	200	680
C3	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	400	650
C4	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.20	2	600	580
D1	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	0	400	570
D2	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	1	400	550
D3	1	0.2	0.1	0.1	1.0	0.35	2.5	0.18	3	400	510

w is mass fraction. φ is volume fraction.

续搅拌 5 min。搅拌完毕后立即将 UHPC 装入钢模，并振动成型。

UHPC 的养护依据活性粉末混凝土规范 GB/T31387[17]进行升温养护。依据我国超高性能混凝土规范[17–18]，在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 10 000 kN 压力试验机上进行 UHPC 立方体抗压试验。

2 结果与讨论

2.1 含粗骨料 UHPC 的立方体抗压强度

将实测含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度值绘于图 1。图 1 中数据点为相同规格 12 个含粗骨料 UHPC 立方体试件抗压强度的平均值。按照活性粉末混凝土规范 GB/T 31387–2015[17]和超高性能混凝土基本性能与试验方法 T/CBMF37–2018[18]，以边长 100 mm 的立方体试件为标准试件。由图 1 可知：粗骨料含量对 UHPC 立方体抗压强度有较大影响，粗骨料含量在 0 至 400 kg/m^3 范围内，UHPC 立方体抗压强度随粗骨料含量的增大逐渐提高，不含粗骨料 UHPC 标准立方体试件抗压强度约为含 200 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 98%，约为含 400 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 96%。粗骨料含量超过 400 kg 后，UHPC 立方体抗压强度显著降低，含 600 kg/m^3 粗骨料 UHPC 标准立方体试件抗压强度约为含 400 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 85%。

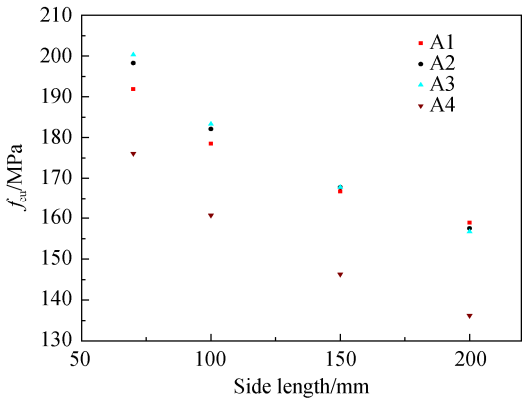
随水胶比的增大，含粗骨料 UHPC 立方体试件抗压强度逐渐减小。水胶比 0.18 和 0.20 下，含粗骨料 UHPC 标准立方体试件抗压强度分别约为水胶比 0.16 下含粗骨料 UHPC 的 92%和 85%。

随钢纤维体积掺量的提高，含粗骨料 UHPC 的立方体抗压强度呈增大趋势。钢纤维体积掺量为 1%、2%和 3%下标准立方体试件抗压强度分别为未掺入钢纤维 UHPC 的 1.10 倍、1.15 倍和 1.19 倍。

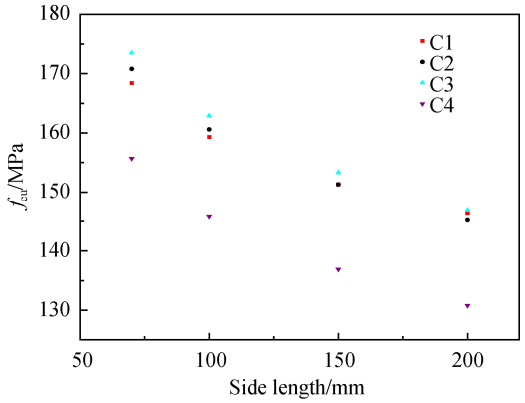
由图 1 可知，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度随试件边长的增大呈降低趋势，具有较明显的尺寸效应特征。

2.2 尺寸效应

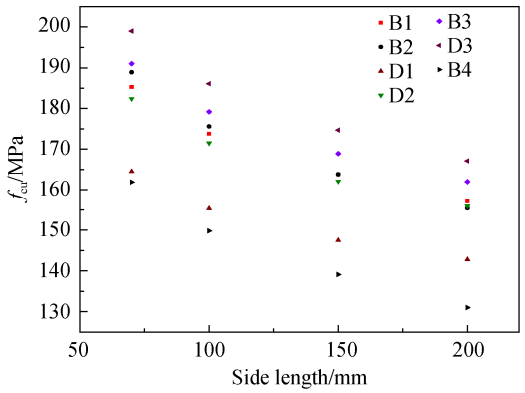
2.2.1 粗骨料含量对尺寸效应的影响 以边长 70 mm、150 mm 和 200 mm UHPC 立方体试件和边长 100 mm 标准立方体试件[17–18]间抗压强度的差值占标准立方体试件抗压强度的百分比为尺寸效应度[9]，以尺寸效应度对含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应进行定量描述。立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{150} 和 η_{200} 分别按式(1)至式(3)计算：



(a) r=0.16



(b) r =0.20



(c) r =0.18

图 1 含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度 f_{cu} 实测值

Fig. 1 Cubic compressive strengths f_{cu} of UHPC containing coarse aggregate

$$\eta_{70}=\frac{\left|f_{cu,100}-f_{cu,70}\right|}{f_{cu,100}}\times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{150}=\frac{\left|f_{cu,100}-f_{cu,150}\right|}{f_{cu,100}}\times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{200}=\frac{\left|f_{cu,100}-f_{cu,200}\right|}{f_{cu,100}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：$f_{cu,70}$、$f_{cu,100}$、$f_{cu,150}$ 和 $f_{cu,200}$ 依次为边长 70、

100、150 mm 和 200 mm UHPC 立方体试件的抗压强度值，MPa。

立方体抗压强度尺寸效应度 η 可直观反映立方体抗压强度的尺寸效应，尺寸效应度 η 值越大表明立方体抗压强度的尺寸效应趋于显著。根据实测结果，计算得到不同粗骨料含量下 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{150} 和 η_{200}，如图 2 所示。

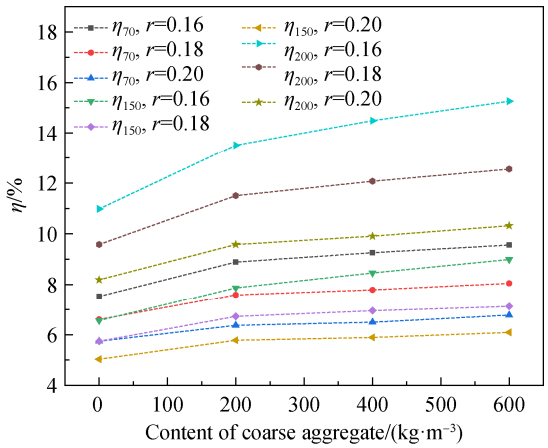


图 2　含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η

Fig. 2　Scale effect parameter η of UHPC containing coarse aggregate

从图 2 可知：含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{150} 和 η_{200} 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/m^3 粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70} 分别为不含粗骨料 UHPC 的 1.27 倍、1.22 倍和 1.18 倍，分别为含 200 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 1.08 倍、1.07 倍和 1.06 倍；含 600 kg/m^3 粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η_{200} 分别为不含粗骨料 UHPC 的 1.39 倍、1.31 倍和 1.26 倍，分别为含 200 kg 粗骨料 UHPC 的 1.13 倍、1.09 倍和 1.08 倍。

统计尺寸效应理论指出强度尺寸效应由材料的非均质性引发，试件尺寸越小，内部包含低强度单元概率越低，试件表征出较高的强度。水泥基材料的均质性与材料的组成密切相关，文献[16]研究成果表明：混凝土中水泥砂浆基体和粗骨料的均质性较好，对尺寸效应影响较小；界面过渡区的强度较低且离散性较大，是影响尺寸效应的主要因素。不含粗骨料的 UHPC 由水泥砂浆基体组成，内部材料均质性较强，尺寸效应较弱。含粗骨料 UHPC 材料内包含大量界面过渡区，具有较强的尺寸效应特征。

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 立方体抗压试验的实测结果，计算得到各水胶比下立方体抗压强度尺寸效应度 η 值，如图 3。

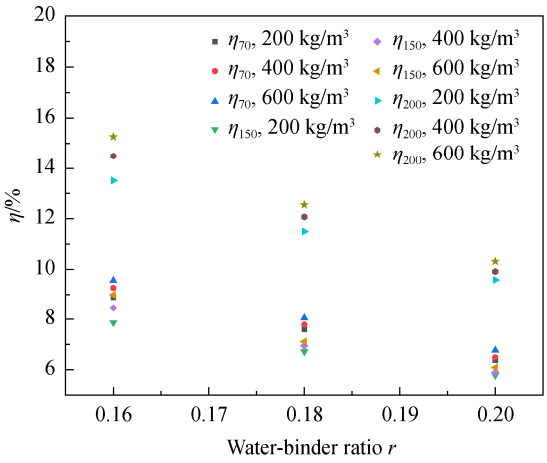


图 3　不同水胶比下 UHP 立方体抗压强度尺寸效应度 η

Fig. 3　Scale effect parameter η of UHPC with various water-binder ratio

由图 3 可知：随水胶比的增大，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η 逐渐降低。水胶比 0.16 下，含 200、400 kg/m^3 和 600 kg/m^3 粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70} 分别为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 1.39 倍、1.41 倍和 1.42 倍，立方体抗压强度尺寸效应 η_{150} 依次为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 1.36 倍、1.43 倍与 1.47 倍。

随水胶比的降低，UHPC 工作性逐渐下降，浇筑时试件内气孔气泡等难以排出，形成初始缺陷。同时，因材料水胶比较低，试件内存在大量未水化完全的颗粒，也形成了较多初始缺陷。低水胶比试件中众多初始缺陷的存在，大幅增强了试件抗压强度的尺寸效应。

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/m^3 粗骨料下，4 种钢纤维体积掺量下 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度 η 如图 4 所示。

由图 4 可知：含粗骨料 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度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 立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{150} 和 η_{200} 分别为不含钢纤维 UHPC 的 118%、123%和 127%，分别为含 1%钢纤维 UHPC 的 109%、112%和 114%。这与文献[10–11]关于不含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应结论一致。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[17]。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。

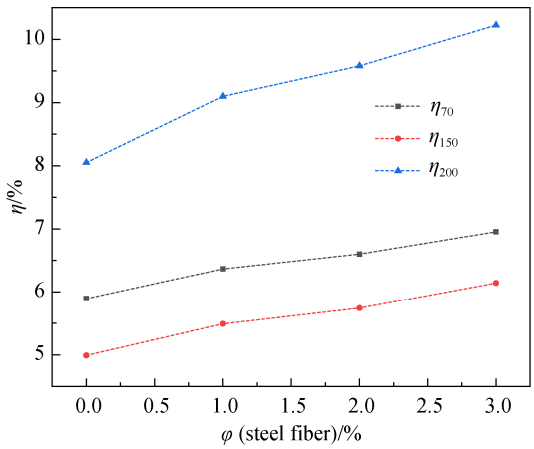


图 4 不同钢纤维掺量 φ 下 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度

Fig. 4 Scale effect parameter of UHPC with various volume fraction φ of steel fiber

2.2.4 尺寸换算系数分析 按照 UHPC 材料规范[17–19]，以边长 100 mm 立方体试件为标准试件，计算得到含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{cu,100}/f_{cu,70}$、$f_{cu,100}/f_{cu,150}$ 和 $f_{cu,100}/f_{cu,200}$，如图 5 所示。

由图 5a 可知，随粗骨料含量的提高，各立方体抗压强度尺寸换算系数值均逐渐偏离 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 下，含粗 600 kg/m^3 骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{cu,100}/f_{cu,70}$、$f_{cu,100}/f_{cu,150}$ 和 $f_{cu,100}/f_{cu,200}$ 分别约为不含粗骨料 UHPC 的 98%、102%和 106%。

由图 5b 可知，随水胶比的增大，各立方体抗压强度尺寸换算系数值趋近于 1，表明尺寸效应随水胶比增大呈减弱趋势。水胶比 0.16 和 0.18 下，含 400 kg/m^3 粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{cu,100}/f_{cu,70}$ 约为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 96%和 98%，立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{cu,100}/f_{cu,150}$ 约为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 104%和 102%，立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{cu,100}/f_{cu,200}$ 约为水胶比 0.20 下相同粗骨料含量 UHPC 的 105%和 103%。

收集整理国内外含粗骨料 UHPC 立方体抗压试验研究成果[5–8]，结合本研究立方体抗压强度试验数据，对立方体抗压强度尺寸换算系数进行修正，修正后尺寸换算系数如表 2 所示。分析采用的含粗骨料 UHPC 试件总计 135 组，边长范围为 70 mm 至 200 mm，粗骨料含量为 200 kg/m^3 至 600 kg/m^3，钢纤维体积掺量为 0 至 3%。经统计分析，3 个尺寸换算系数方差范围为 0.01 至 0.03，变异系数范围为 1.3%至 2.9%。

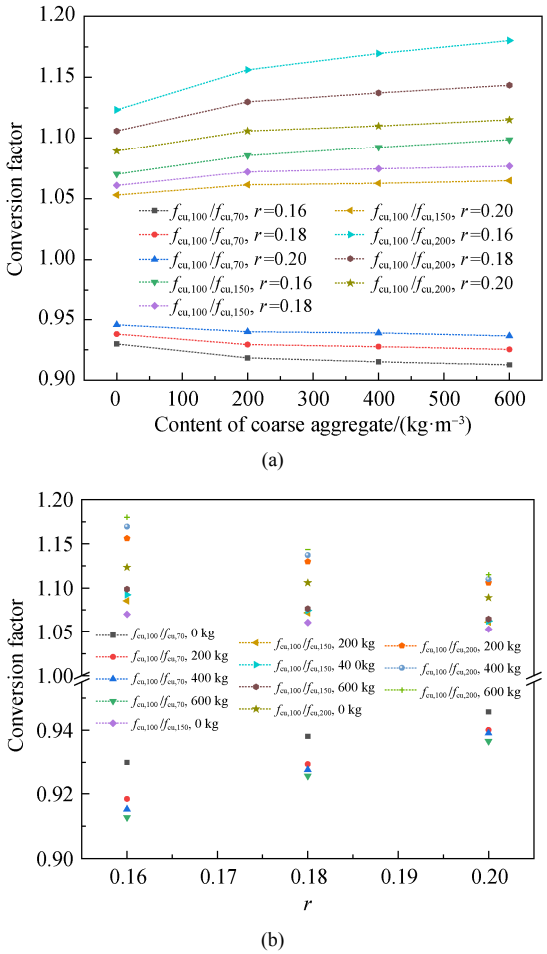


图 5 立方体抗压强度尺寸效应换算系数

Fig. 5 Conversion factors for cubic compressive strengths

表 2 立方体抗压强度尺寸换算系数建议值

Table 2 Value of conversion factor for cubic compressive strengths

$f_{cu,100}/f_{cu,70}$	$f_{cu,100}/f_{cu,150}$	$f_{cu,100}/f_{cu,200}$
0.924	1.080	1.146

2.3 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，提出了适用于受压试件的名义强度 σ_N 与试件尺寸 D 分析公式[20]：

$$\sigma_N = c_1 D^{-2/5} + c_0 \quad (4)$$

其中：c_0 和 c_1 为材料参数，通过试验数据确定；D

为试件边长，mm。

文献[10]研究表明式(4)对不含粗骨料 UIHPC 立方体抗压强度分析具有良好的适用性。为检验式(4)对含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度分析的适用性，采用关于含粗骨料 UHPC 立方体抗压试验[5–8]和本试验结果，样本包含 105 组水胶比为 0.14 至 0.22，粗骨料含量为 0 至 1 200 kg/m^3，钢纤维掺量范围为 0 至 3%，边长为 70 mm 至 200 mm UHPC 立方体试件抗压强度数据拟合式(4)。

通过计算，得到式(4)中材料参数 c_0 和 c_1，列于表 3。文献[4–9]立方体抗压强度试验结果与式(4)分析结果的相关系数为 0.984，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})	c_0			c_1		
	r=0.16	r =0.18	r =0.20	r =0.16	r =0.18	r =0.20
0	96.11	103.40	103.95	522.77	446.85	351.40
200	80.37	91.99	96.38	644.52	529.56	406.54
400	74.27	90.50	96.04	689.46	561.60	423.30
600	60.64	72.88	83.51	631.97	486.95	394.46

c_0 and c_1 are parameters of materials.

根据表 3 中材料参数 c_0 和 c_1 值进行数据拟合，建立式(4)中材料参数 c_0 和 c_1 与水胶比及粗骨料含量的关系，如式(5)和式(6)。拟合结果与实测数据相关系数分别为 0.856 和 0.894，表明吻合良好，可按式(5)和式(6)对不同粗骨料含量与水胶比下 UHPC 立方体抗压强度分析式中材料参数 c_0 和 c_1 进行计算。

$$c_0 = 428.06r - 0.04R + 23.81 \tag{5}$$

$$c_1 = -5706.37r + 0.11R + 1501.05 \tag{6}$$

式中：r 为水胶比；R 为粗骨料含量，kg/m^3。

3　结论

1) 随水胶比的提高，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度呈减小趋势。水胶比 0.18 和 0.20 下含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度分别约为水胶比 0.16 下含粗骨料 UHPC 的 92%和 85%。随粗骨料含量的增大，UHPC 立方体抗压强度呈先增大后减小趋势，不含粗骨料 UHPC 标准立方体试件抗压强度约为含 400 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 96%，约为含 600 kg/m^3 粗骨料 UHPC 的 116%。

2) 粗骨料含量对 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应影响较大，含 600 kg/m^3 粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度约为粗骨料含量为 0 下 UHPC 的 1.39 倍。

3) 随水胶比的提高，含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应逐渐减弱。水胶比 0.16 下含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度约为水胶比 0.20 下的 1.41 倍。

4) 含粗骨料 UHPC 立方体抗压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 立方体抗压强度尺寸效应度约为不掺钢纤维 UHPC 的 1.27 倍。

5) 提出了含粗骨料 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数建议值。

6) 提出了尺寸效应的参数计算公式，可预测含粗骨料 UHPC 的立方体抗压强度。

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 200-800MPa compressive strength[J]. ACI Special Public, 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]. 华北水利水电学院院报, 2013, 34(1): 1–6.
PENG Gaifei, TENG Yan, HUANG Yanzhu, et al. J North China Univ Water Resour Elcctr 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, 史才军, 秦红杰, 等. 超高性能混凝土抗折强度尺寸效应[J]. 2020, 48(11): 1740–1746.
SU Jie, SHI Caijun, QIN Hongjie, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(11): 1740–1746.

[10] 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]. 2021, 49(2): 305–311.
SU Jie, LIU Wei, SHI Caijun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 305–311.

[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] 张立军. 活性粉末混凝土材料强度的尺寸效应[D]. 北京: 北京交通大学硕士学位论文, 2006: 5–20.
ZHANG Lijun. Size effect on the material strengths of reactive powder concrete (dissertation, in Chinese). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006: 5–20.

[13] 陈宝春, 杨简, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土形状与尺寸效应[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 391–398.
CHEN Baochun, YANG Jian, HUANG Qingwei, et al. J Fuzhou Univ: Nat Sci Ed(in Chinese), 2019, 47(3): 391–398.

[14] 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.

[15] 苏捷, 方志, 杨钻. 骨料组分和强度等级对混凝土单轴受压性能尺寸效应的影响[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 120–127.
SU Jie, FANG Zhi, YANG Zuan. J Build Struct (in Chinese), 2018, 35(5): 120–127.

[16] 文成成. 超高性能混凝土工作与力学性能及微观结构研究[D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2020: 49–53
WEN Chengcheng. Study on workability and mechanical properties and microstructure of ultra high performance concrete (dissertation, in Chinese). Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 49–53.

[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.