第 49 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 2
2021 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200392

超高性能混凝土立方体抗压强度尺寸效应

苏　捷[1,2]，刘　伟[1]，史才军[1,2]，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：通过 5 种几何尺寸、3 个强度等级和 4 种钢纤维掺量的超高性能混凝土(UHPC)立方体试件的抗压试验，研究了强度等级和钢纤维体积掺量等对 UHPC 立方体抗压强度及尺寸效应的影响，结果表明：UHPC 立方体试件抗压强度的尺寸效应随强度等级的增加而趋于明显，R160 级 UHPC 基体抗压强度尺寸效应度约为 R120 级 UHPC 基体的 1.72 倍。钢纤维掺量对 UHPC 抗压强度尺寸效应有较大影响，掺入 3%钢纤维 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度比未掺加钢纤维的试件提高了 46%。提出了 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数建议值，建立了 UHPC 抗压强度尺寸效应律中参数的计算公式，可用于 UHPC 立方体抗压强度的分析计算。

关键词：超高性能混凝土；立方体抗压强度；尺寸效应；钢纤维
中图分类号：TU5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0305–07
网络出版时间：2020–11–24



Scale Effect of Cubic Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete

SU Jie[1,2], *LIU Wei*[1], *SHI Caijun*[1,2], *FANG Zhi*[1]

(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: The effects of strength grade, steel fiber content on the compressive strength and its scale effect of ultra-high performance concrete (UHPC) were investigated via cubic compressive strength tests on the UHPC cubic specimens with different sizes, strength grades and fiber contents. The results show that the scale effect of the cubic compressive strength becomes more obvious with the increase of strength grade. The scale effect of the cubic compressive strength of the plain UHPC specimen with a strength grade R160 is 1.72 times greater than that of the specimen with a strength grade of R120. The content of steel fiber has an effect on the scale effect of the cubic compressive strength. The greater the content of steel fiber is, the more pronounced the scale effect will be. The scale effect on the cubic compressive strength of specimens with a fiber content of 3% is 46%greater than that of the specimens without steel fiber reinforcement. The size conversion factors for cubic compressive strength of the UHPC with different strength grade sand the calculation formulas for the scale effect law of the cubic compressive strength of the UHPC are proposed. The proposed formulas can be used to analyze the cubic compressive strength of the UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; cubic compressive strength; scale effect; steel fiber

超高性能混凝土(UHPC)[1–2]是一种新型高性能水泥基复合材料，具有超高强度和韧性，优良的耐久性及长期稳定性等优点[3]，在大型土木工程结构中具有广阔的应用前景。美国、法国、日本和瑞士等国近年来颁布了一系列材料、设计和施工规范规程[4–9]，为 UHPC 的应用推广提供了依据，我国也在 2015 年颁布了首部 UHPC 材料规程[10]。UHPC 具有超高强度，受加载设备限制，在构件力学性能及抗震性能研究中多通过缩尺模型模拟。作为一种水泥基材料，尺寸效应是 UHPC 材料的固有特性，即材料强度与结构或构件的尺寸具有相关性，使得大尺寸实际结构性能和缩尺模型测试结果存在差异。如何确保缩尺模型测试结果在足尺实际工程中的适用性和工程结构的可靠性，需要对 UHPC 材料

收稿日期：2020–06–03。　修订日期：2020–07–07。
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)；国家自然科学基金项目(51408213)；湖南省自然科学基金项目(2018JJ2042)。
第一作者：苏　捷(1979—)，男，博士，副教授。

Receive date: 2020–06–03.　Revised date：2020–07–07.
First author: SU Jie (1979–), male, Ph. D, Associate Professor.
E-mail: iamsujie@163.com

力学性能尺寸效应充分掌握。

目前，国内外已对 UHPC 抗压性能及尺寸效应进行了一些研究。马恺泽[11]、水亮亮[12]、张立军[13]和陈宝春[14−15]等研究了钢纤维体积掺量、外加剂类型和养护方式等对 UHPC 立方体抗压强度和轴心抗压强度尺寸效应的影响，发现适当掺入膨胀剂和湿热养护可有效减少 UHPC 抗压强度的尺寸效应。罗晨熙等[16]通过对不同钢纤维类型和掺量的 UHPC 试件进行抗压强度尺寸效应试验，分析了钢纤维对 UHPC 抗压强度尺寸效应的影响。

立方体抗压强度是混凝土重要受压性能指标之一，具有试验方法便捷和测试结果稳定等优点。我国混凝土结构设计规范[17]和超高性能混凝土技术规程[18]规定立方体抗压强度是混凝土和 UHPC 各项力学性能指标的基本代表值。根据材料的立方体抗压强度，通过一系列换算关系，可计算得到其它力学性能指标，如轴心抗压强度、轴心抗拉初裂强度和轴心抗拉强度等。已有研究表明[16,19−20]抗压强度的尺寸效应与包括混凝土强度等级、水胶比、钢纤维掺量等众多因素有关。尽管目前国内外对 UHPC 抗压强度尺寸效应的研究已取得了一定成果，但多为针对某一特定配合比或强度等级 UHPC 的尺寸效应。关于多因素包括强度等级、水胶比和钢纤维等耦合作用对 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应的研究尚不充分，不足以为材料和结构规范规程的编制提供有效支撑。基于此，对 UHPC 立方体抗压强度及尺寸效应进行系统的试验研究，分析了钢纤维掺量和混凝土强度等级等对尺寸效应的影响，建立了 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应律。

1 实验

1.1 试件设计

为研究不同强度等级 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应，以水胶比 0.16、0.18 和 0.2 分别制备强度等级为 R120 级、R140 级和 R160 级 UHPC 试件。设计了 4 组不同纤维体积掺量，分别为 0、1%、2%和 3%，以分析钢纤维掺量对 UHPC 立方体抗压强度及尺寸效应的影响。

每一强度等级和钢纤维掺量的 UHPC 制备 5 种尺寸立方体试件，边长依次为 40.0、70.7、100.0、150.0 mm 和 200.0 mm。全部 UHPC 立方体试件共计 60 个规格，每种规格制备 10 个试件。

1.2 原材料和 UHPC 配合比

水泥：采用强度等级为 52.5 的普通硅酸盐水泥，3、28 d 抗压强度分别为 29.3、59.3 MPa。硅灰：SiO_2 含量为 95.6%，平均粒径为 0.1 μm，密度为 2.37 g/cm^3，比表面积为 18 730 m^2/kg。矿渣：采用超细矿渣粉，比表面积为 811 m^2/kg。粉煤灰：采用 I 级超细粉煤灰，SiO_2 含量为 56.1%，比表面积为 693 m^2/kg。细骨料。石英粉采用 300 目精制石英粉，石英砂采用最大粒径 1.25 mm 的天然河砂。水：采用自来水；减水剂：采用聚羧酸高效减水剂，减水率为 34%。钢纤维：等效直径 0.2 mm，长度 13 mm（长径比 65）。

各强度等级 UHPC 采用的配合比列于表 1。我国现行 UHPC 规范[10]指出 UHPC 强度测试应采用边长 100 mm 标准立方体试件，并规定了各强度等级 UHPC 中最小钢纤维掺量。基于此，依据我国规范[10]相关规定，采用 2%钢纤维掺量的 100 mm 立方体试件为基准试件，以基准试件抗压强度划分材料的强度等级。表 1 中所列抗压强度值为各强度等级下 10 块基准试件立方体试件抗压度实测值的平均值。

表 1 UHPC 配合比

Table 1 Mix Proportion of UHPC

Strength grade	Mass ratio						*w*(Water reducer)/%	Water binder ratio	Compressive Strength/MPa
	Cement	Silica fume	Fly ash	Slag	Fine aggregate				
					Sand	Quartz powder			
R120	1	0.2	0.1	0.1	1.1	0.35	2.5	0.20	133.4
R140	1	0.2	0.1	0.1	1.1	0.35	2.5	0.18	155.1
R160	1	0.2	0.1	0.1	1.1	0.35	2.5	0.16	179.3

w is mass fraction.

1.3 试件制作与加载

为减小测试结果的离散性，全部 UHPC 立方体试件采用相同的制作流程：首先将水泥、硅灰、粉煤灰、矿渣、石英砂及石英粉投入搅拌机，进行 3 min 干拌；然后加入减水剂，继续干拌 2 min。干拌完毕后加入水，湿拌 6 min 至 UHPC 完全呈流态。最后加入钢纤维，继续搅拌 6 min，使钢纤维与 UHPC 浆体完全拌匀。将搅拌好的 UHPC 装入试模，震动密实 1 min。试件成型后在标准养护室养护 48 h 后泡入 90 ℃热水养护 48 h。

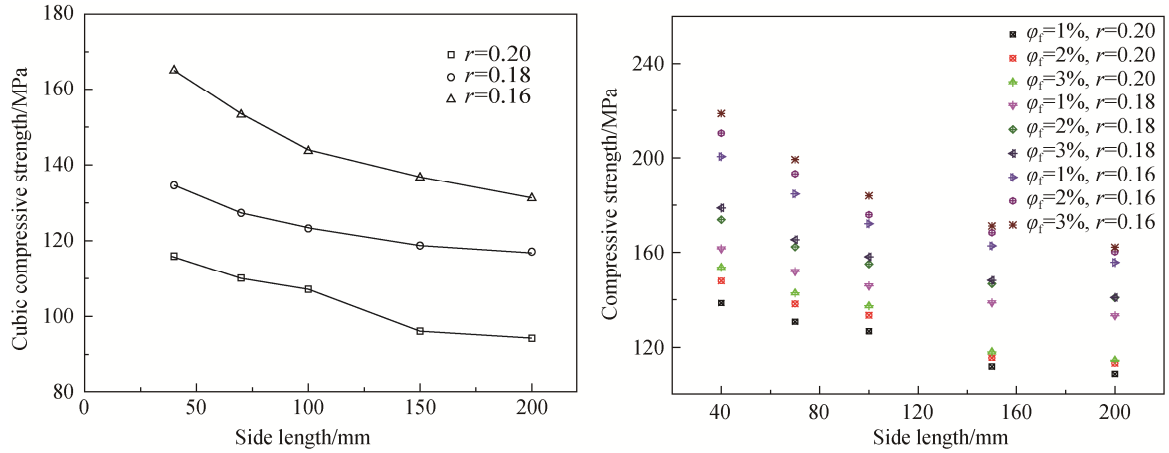
UHPC 抗压试验按照标准试验方法[10]进行，加载采用湖南大学 10MN 电液伺服式压力试验机，加载速率为 1.2 MPa/s。

2　结果与讨论

2.1　立方体抗压强度实测值

实测各规格 UHPC 立方体试件抗压强度值如图 1 所示。图 1 中数据为同规格 10 个试件立方体抗压强度的平均值。对实测立方体抗压强度进行统计分析，各规格试件立方体抗压强度变异系数范围为 1.5%至 3.1%，表明试验结果离散性较小。通过分析不同强度等级 UHPC 标准尺寸立方体试件抗压强度值可知：UHPC 基体(钢纤维掺量为 0)立方体抗压强度随强度等级的提高而逐渐增大，R140 级和 R160 级 UHPC 基体立方体抗压强度分别比 R120 级提高了约 15%和 34%。钢纤维可有效提高立方体试件的受压性能，掺入 1%、2%和 3%钢纤维的 R140 级 UHPC 标准立方体试件的抗压强度依次为未配置钢纤维试件的 1.18 倍、1.25 倍和 1.28 倍。

由图 1 可知，3 个强度等级的 UHPC 立方体试件抗压强度均具有一定程度的尺寸效应现象，表现为强度随试件几何尺寸的增大具有逐渐降低的趋势。



(a) Plain UHPC　　(b) With fiber reinforcement

r is water-cement ratio. φ_f is volume fraction of fiber.

图 1　立方体抗压强度实测值

Fig. 1　Cubic compressive strengths of UHPC

2.2　尺寸效应分析

2.2.1　强度等级对尺寸效应的影响　　参照文献[19]，引入尺寸效应度定量地表征 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应。在 UHPC 尺寸效应分析中，以边长 40 mm 的 UHPC 立方体试件为基准试件，定义另外 4 种尺寸试件抗压强度值与基准试件抗压强度值之差占基准试件抗压强度值的百分比为尺寸效应度 η：

$$\eta_{70}=\frac{f_{cu,40}-f_{cu,70.7}}{f_{cu,40}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\eta_{100}=\frac{f_{cu,40}-f_{cu100}}{f_{cu,40}}\times 100\% \tag{2}$$

$$\eta_{150}=\frac{f_{cu,40}-f_{cu150}}{f_{cu,40}}\times 100\% \tag{3}$$

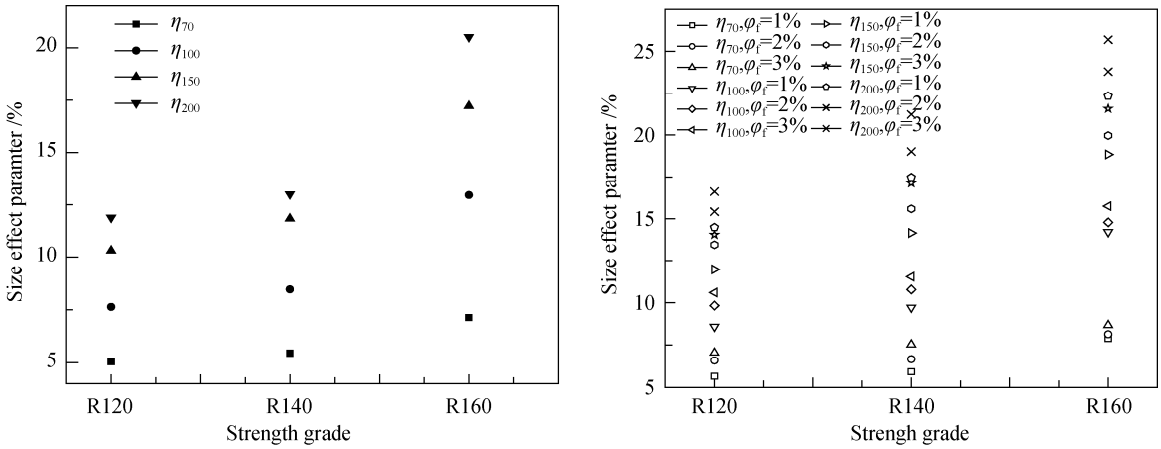
$$\eta_{200}=\frac{f_{cu,40}-f_{cu200}}{f_{cu,40}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：$f_{cu,40}$、$f_{cu,70.7}$、$f_{cu,100}$、$f_{cu,150}$和$f_{cu,200}$依次为边长 40、70.7、100、150 mm 和 200 mm 立方体试件的抗压强度，MPa。

将实测各规格 UHPC 试件立方体抗压强度值代入式(1)至(4)，计算得到抗压强度尺寸效应度 η 值，见图 2。

由图 2 可知：各规格 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度 η 随强度等级的提高呈增大的趋势。R160 级 UHPC 基体立方体抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{100}、η_{150}和η_{200}分别约为 R140 级立方体试件的 1.31 倍、1.45 倍、1.53 倍与 1.58 倍，分别约为 R120 级立方体试件的 1.41 倍、1.66 倍、1.69 倍和 1.72 倍。由表 1 可知，低强度等级试件由于采用了较高的水胶比，其内部存在较多的微孔洞和空隙，有利于缓解试件受压下的应力集中，起裂后裂纹发展更为曲折，破损区域较大，造成破坏所需能量相对较大，导致尺寸效应低于高强度等级试件。R160 级掺入为 3%钢纤维 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度 η_{70}、η_{100}、η_{150}和η_{200}分别约为 R120 级相应试件的 1.23 倍、1.48 倍、

1.53 倍和 1.55 倍，较未配钢纤维试件降低了约 12%。掺有钢纤维的 UHPC 立方体试件在加载破坏过程中，当荷载达到初裂荷载后，UHPC 基体达到极限强度而开裂失效，部分荷载转由钢纤维承担，试件内产生应力重分布现象。随着加载继续进行，试件内的钢纤维承受了更多和荷载，减弱了 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应现象。此外，掺有钢纤维的 UHPC 试件延性较好，钢纤维的“桥接作用”导致裂缝发展将绕过纤维，改变了受荷过程中裂缝发展的形态和进程，增大了断裂韧性，使得强度等级对试件立方体抗压强度尺寸效应的影响有所减弱。



(a) Plain UHPC (b) With fiber reinforcement

图 2 不同强度等级 UHPC 立方体强度尺寸效应度

Fig. 2 Scale effect parameter of UHPC with various strength grade

2.2.2 钢纤维掺量对尺寸效应的影响 根据实测各钢纤维掺量下 UHPC 试件立方体抗压强度，按式(1)至式(4)计算得到抗压强度尺寸效应度 η 值，并将其随钢纤维掺量变化规律绘于图 3。

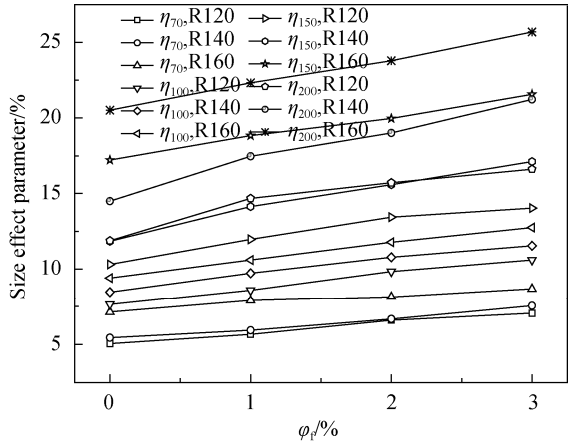


图 3 不同钢纤维掺量 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度

Fig. 3 Scale effect parameter of UHPC with various fiber contents

分析图 3 可知：掺入钢纤维后，UHPC 立方体试件抗压强度的尺寸效应度呈增大的趋势。钢纤维掺量分别为 1%，2%和 3%的 R140 级 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸效应度 η_{70} 比未掺加钢纤维的 UHPC 立方体试件分别提高了 9%，22%和 38%，尺寸效应度 η_{100} 增大了 15%、27%和 36%，尺寸效应度 η_{150} 增大了 19%、31%和 44%，尺寸效应度 η_{200} 增大了 20%、31%和 46%，变化规律与张立军[13]和罗晨熙[16]的研究结果一致。原因是：试件浇筑成型时，因受试模壁的阻碍作用，试件外表面位置附近的钢纤维在浇筑振捣过程中逐渐改变其杂乱分布的状态而呈现出平行于试件表面的取向，这种平行边界分布的钢纤维像“箍筋”一样对试件产生约束增强作用，即边壁效应[18]。试件几何尺寸越小，边壁效应的增强作用占的比例越大，从而导致更明显的尺寸效应现象。此外，当钢纤维掺量较高时，在搅拌过程中纤维更易出现结团的现象，从而在试件中形成缺陷，增强了立方体抗压强度的尺寸效应。

2.2.3 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 采用尺寸效应度指标 η 可直观定量表征 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应，但不足之处在于需要确定一个参考(基准)试件。为便于尺寸效应的分析，基准试件往往并非规范规程中所规定的标准试件，而是采用研究对象中几何尺寸最大或最小的试件[19–20]。国内外材性试验规范规程中通常确定了标准尺寸试件，并推荐了数个规格的非标准尺寸试件，通过尺寸换算系数考虑尺寸效应的影响，建立标准与非标准试件力学性能参数间的换算关系。参照文献[13–14]

和我国现行规范[10]，以边长 100 mm 的立方体试件为标准试件，定义非标准试件抗压强度与标准试件抗压强度的比值为尺寸换算系数：

$$C_{40} = f_{\mathrm{cu},100} / f_{\mathrm{cu},40} \tag{5}$$

$$C_{70} = f_{\mathrm{cu},100} / f_{\mathrm{cu},70} \tag{6}$$

$$C_{150} = f_{\mathrm{cu},100} / f_{\mathrm{cu},150} \tag{7}$$

$$C_{200} = f_{\mathrm{cu},100} / f_{\mathrm{cu},200} \tag{8}$$

根据试验结果，按式(5)至(8)计算得到各规格 UHPC 立方体试件抗压强度尺寸换算系数，如图 4 所示。

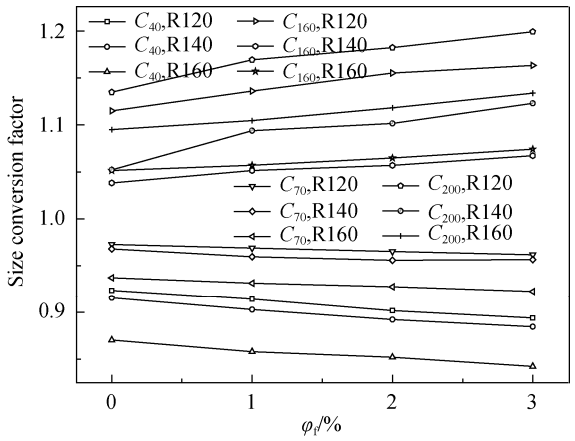


图 4　UHPC 立方体抗压强度尺寸效应换算系数

Fig. 4　Size conversion factors for flexural strengths of UHPC

由图 4 可知：随着钢纤维掺量的提高，非标准试件与标准试件间强度偏差量逐渐增大，尺寸效应有增强趋势，表现为 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 C_{40} 和 C_{70} 呈降低的趋势，而 C_{150} 和 C_{200} 呈升高的趋势。掺加 3%钢纤维的 R140 级 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 C_{40} 和 C_{200} 约为 1%钢纤维掺量 UHPC 试件的 95%和 111%。因此，可偏于安全地将各钢纤维掺量 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数值取为采用 3%钢纤维 UHPC 试件的值，确保 UHPC 结构具体足够的安全储备。

UHPC 基体尺寸换算系数随强度等级的提高具有较明显的变化，R160 级 UHPC 基体尺寸换算系数 C_{40}、C_{70}、C_{150} 和 C_{200} 分别约为 R120 级 UHPC 基体的 0.96 倍、0.95 倍、1.03 和 1.05 倍。掺入钢纤维后尺寸换算系数的变化趋于平缓，钢纤维掺量 3%时 R160 级 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数 C_{40} 和 C_{200} 分别约为同钢纤维掺量 R120 级试件的 0.98 倍和 1.02 倍。

收集国内外 UHPC 立方体抗压强度试验结果[11–16]，结合实测立方体抗压强度，将各规格 UHPC 立方体抗压强度换算系数进行修正，结果列于表 2。在分析中，以边长 100 mm 标准立方体试件抗压强度为基准，将文献和实测立方体抗压强度分别按 120~140 MPa，140~160 MPa 和 160~180 MPa，依次纳入 R120、R140 和 R160 级 UHPC 进行分析。分析采用的 UHPC 立方体试件总计 260 组，边长范围为 40 mm 至 200 mm，钢纤维掺量范围为 1%至 3%，具有较好的代表性。经统计分析可知，UHPC 立方体抗压强度变异系数范围为 1.4%至 3.1%，表明分析结果具有较好的适用性。由表 2 可知：UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数低于我国《混凝土物理力学性能试验方法标准》[21]中所规定的 0.95 和 1.05，表明 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应强于普通混凝土。

表 2　UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数值

Table 2　Value of size conversion factor on the cubic compressive strength of UHPC

Size conversion factor	R120	R140	R160
C_{40}	0.934	0.911	0.873
C_{70}	0.976	0.970	0.958
C_{150}	1.051	1.135	1.164
C_{200}	1.098	1.192	1.274

2.3　尺寸效应律

美国西北大学 Bazant 认为混凝土受压尺寸效应产生的原因是试件加载过程中，其内部的一条主裂缝或裂缝带稳定发展，且在此过程中伴随着应变能的耗散。基于此，他提出试件在受压破坏时名义强度 σ_{N} 和试件尺寸 d 的关系式[22]：

$$\sigma_{\mathrm{N}} = c_1 d^{-2/5} + c_0 \tag{9}$$

式中：c_0 和 c_1 为常数，通过试验数据拟合得到；d 为立方体试件的边长值。

以往的研究[19–20]表明上式对普通混凝土立方体抗压强度有较好的适用性。为验证式(9)在 UHPC 材料中的适用性，以文献[11–16]、文献[23–27]和 UHPC 立方体抗压强度实测值 σ_{N} 和对应的试件尺寸 d 为依据，以尺寸效应律常数 c_0 和 c_1 为参数，采用最小二乘法进行参数拟合。拟合所采用的 UHPC 立方体试件总计 410 组，强度等级范围为 R100 至 R160，边长范围为 40 mm 至 200 mm，钢纤维掺量范围为 0 至 3%，具有较好的代表性。在拟合分析中，以边长 100 mm 标准立方体试件抗压强度为基准，将文献和实测立方体抗压强度分别按 120~140 MPa，

140~160 MPa 和 160~180 MPa，依次纳入 R120、R140 和 R160 级 UHPC 进行分析。

通过拟合分析得到不同钢纤维掺量下 UHPC 立方体抗压强度尺寸效应律计算式(9)中参数 c_0 和 c_1，列于表 3。所收集到的数据和式(9)计算结果相关系数约为 0.975，表明二者吻合较好，可用式(9)分析计算不同尺寸 UHPC 立方体试件的抗压强度。

表 3 尺寸效应公式参数值

Table 3 Parameters in the scale effect equation

Sample No.	R120				R140				R160			
	0	1%	2%	3%	0	1%	2%	3%	0	1%	2%	3%
c_0	70.56	75.71	71.99	70.51	94.63	101.99	104.91	105.62	93.76	109.33	124.53	105.49
c_1	207.56	285.56	335.89	380.16	166.13	253.82	299.49	340.28	312.93	396.85	556.79	521.14

对表 3 中数据进行整理，得到式(9)中参数 c_0 和 c_1 与 UHPC 强度等级及钢纤维掺量的关系式如式(10)和式(11)。分别采用式(10)和式(11)可对 UHPC 立方体试件的抗压强度尺寸效应律参数 c_0 和 c_1 进行计算。

$$c_0=1.26S+16.85\varphi_f-0.13S\varphi_f-74.98 \quad (10)$$

$$c_1=3.06S-15.18\varphi_f+0.46S\varphi_f-148.63 \quad (11)$$

式中：S 为 UHPC 强度等级值，由边长 100 mm 立方体试件确定。对 R120、R140 和 R160 级 UHPC，S 分别取为 120、140 和 160；φ_f 为钢纤维体积分数。

3 结论

1) 随强度等级的提高，UHPC 基体立方体抗压强度尺寸效应逐渐增强，R160 级 UHPC 基体立方体抗压强度的尺寸效应度约为 R120 级 UHPC 基体的 1.72 倍。

2) 受边壁效应影响，高钢纤维掺量 UHPC 立方体抗压强度的尺寸效应较低掺量试件更为显著。钢纤维掺量为 3%UHPC 立方体抗压强度尺寸效应度约为掺量 1%试件的 1.46 倍。

3) 基于收集到的文献资料和本试验结果，提出了 UHPC 立方体抗压强度尺寸换算系数建议值。

4) 不同钢纤维掺量和 UHPC 强度等级下，采用基于能量释放的 Bazant 尺寸效应律计算结果与实测结果吻合良好。

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 Special Publication, 1994, 144(24): 507–518.

[4] RECOMMENDATIONS I. Association Francaise de Genie Civil[S]. 2002.

[5] European Committee for Standardization. National addition to Eurocode 2－design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC): AFNOR N F. P18-710[S]. France: European Committee for Standardization, 2016.

[6] NIWA J. Recommendations for design and construction of ultra-high performance fiber-reinforced concrete structures[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2006.

[7] American Society for Testing and Materials. Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance concrete: C1856/C1856M-17[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2017.

[8] European Committee for Standardization. Testing hardened concrete (part 1): shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds: EN 12390-1[S]. London: European Committee for Standardization, 2000.

[9] GOWRIPALAN N., GILBERT R I. Design guidelines for ductal prestressed concrete beams[S]. Sydney: Ductal ＆VSL (Aust) Pty Ltd., 2000.

[10] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China. Reactive powder concrete[S]. Beijing: Press of Building Industry, 2015.

[11] 马恺泽, 阙昂, 刘超. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响分析[J]. 混凝土, 2016, 317(3): 76–82.
MA Kaize, QUE Ang, LIU Chao. Concrete(in Chinese), 2016, 317(3): 76–82.

[12] 水亮亮. 超高性能混凝土抗压强度尺寸效应及收缩特性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 632–639.
SHUI Liangliang. J Build Mater(in Chinese), 2019, 22(4): 632–639.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 杜任远, 陈宝春, 胡长福. 试件尺寸对超高性能混凝土抗压强度的

影响[C]. 第 3 届井冈山论坛, 南昌, 2016: 58–62.
DU Renyuan, CHEN Baochun, HU Changfu. 3rd Jinggangshan Forum, Nanchang, 2016: 58–62.

[16] 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.

[17] 中华人民共和国住房与城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010(2015 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China. Code for design of concrete structures[S]. Beijing: Press of Building Industry, 2015.

[18] 湖南省住房和城乡建设厅. 活性粉末混凝土技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Department of housing and urban rural development of Hunan Province. Technical specification for reactive powder concrete structures[S]. Beijing: Press of Building Industry, 2017.

[19] 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.

[20] 苏捷,方志.普通混凝土与高强混凝土抗压强度的尺寸效应[J].建筑材料学报,2013, 16(6): 1078–1083.
SU Jie, FANG Zhi. J Build Mater (in Chinese), 2013, 16(6): 1078–1083.

[21] 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: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of housing and urban rural development of the people's Republic of China. Standard for test method of concrete physical and mechanical properties[S]. Beijing: Beijing: Press of Building Industry, 2019.

[22] BAZENT Z, CHEN E P. 结构破坏的尺度率[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383–426.
BAZANT Z P, CHEN E P.. Adv Mech (in Chinese), 1999, 29(3): 383–426.

[23] KUSUNAWARDANUNGSIH Y, FEHLING E, ISAMIL M. UHPC compressive strength test specimens: cylinder or cube[J]. Proc Eng, 2015, 125: 1076–1080.

[24] 郑文忠, 卢珊珊, 张明辉. 掺粉煤灰和矿渣粉的活性粉末混凝土梁受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 62–70.
ZHENG Wenzhong, LU Shanshan, ZHANG Minghui. J Build Struct (in Chinese), 2009, 30(3): 62–70.

[25] 秦子鹏, 杜应吉, 田艳. 高强活性粉末混凝土尺寸效应的研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(9): 92–94.
QIN Zipeng, DU Yingji, TIAN Yan. China Rural Water Conservancy and Hydropower(in Chinese). 2013(9): 92–94.

[26] 单波. 活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2002: 14–17.
SHAN Bo. Experimental study on the mechanical properties of reactive powder concrete[dissertation, in Chinese]. Changsha: Hunan University, 2002: 14–17.

[27] 方志, 周传波. 活性粉末混凝土动静弹性模量试验研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 128–135.
FANG Zih, ZHOU Chuanbo. J China Railway Soc(in Chinese), 2018, 40(9): 128–135.