第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200049

超高性能混凝土抗折强度尺寸效应

苏 捷[1,2]，史才军[1,2]，秦红杰[1]，张 祥[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 3 个强度等级、2 种钢纤维类型和 4 组钢纤维掺量超高性能混凝土(UHPC)小梁试件的抗折试验，研究了强度等级、钢纤维类型和体积掺量对超高性能混凝土抗折强度及尺寸效应的影响。结果表明：随 UHPC 强度等级的增加，小梁试件抗折强度尺寸效应趋于明显，R160 级试件抗折强度尺寸效应约为 R120 试件的 1.26 倍。钢纤维掺量对 UHPC 抗折强度尺寸效应有较大影响，钢纤维掺量越大，尺寸效应越明显，掺入 3% (体积分数)平直型钢纤维和端勾型钢纤维的 R120 级 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应比未掺加钢纤维的试件提高了 71%和 78%。建议了 UHPC 抗折强度尺寸换算系数，提出了 UHPC 抗折强度尺寸效应律计算公式。

关键词：超高性能混凝土；抗折强度；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(2020)11–1740–07
网络出版时间：2020–09–18



Scale Effect of Flexural Strength on Ultra-high Performance Concrete

SU Jie[1,2], *SHI Caijun*[1,2], *QIN Hongjie*[1], *ZHANG Xiang*[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 flexural strength of ultra-high performance concrete prism specimens with three kinds of strength grades, two types of steel fibers and four groups of fiber contents was determined to investigate the effects of strength grade, steel fiber and fiber content on the flexural strength and its size effect of ultra-high performance concrete. The results show that the size effect of the flexural strength becomes more obvious as the strength grade increases. The scale effect of the flexural strength of the specimen with a strength grade of R160 is 1.26 times greater than that of the specimen with a strength grade of R120. The content of steel fiber has an effect on the size effect of the flexural strength. The larger the content of steel fiber is, the more pronounced the size effect will be. The flexural strength of specimens with straight fiber and hook fiber and strength grade of R120 at a fiber content 3% (volume fraction) is 71% and 78% greater than that of the specimens without steel fiber reinforcement, respectively. The size conversion factor for the flexural strength of ultra-high performance concrete with different strength grades was given. The calculation formulas for the size effect law of the flexural strength of ultra-high performance concrete were proposed.

Keywords: ultra-high performance concrete; flexural strength; size effect; steel fiber

超高性能混凝土(UHPC)[1−2]是近年发展起来的一种新型水泥基复合材料，由 Rhodia、Lafarge、Bouygue 和 VSL 共同开发[3]。UHPC 材料具有超高强度、韧性、优良耐久性及长期稳定性等优点，在大型和超大型土木工程结构中具有非常广阔的应用前景。为推动 UHPC 在土木工程的应用，欧美各国逐步推出了一系列材料、设计和施工规范规程[4–9]，我国也在 2013 年颁布了首部 UHPC 材料规程[10]。UHPC 材料强度较高，受加载装置限制，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的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

收稿日期：2020–01–31。　修订日期：2020–03–09。
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: 2020–01–31.　**Revised date:** 2020–03–09.
First author: SU Jie (1979–), male, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: iamsujie@163.com

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 材料力学性能的尺寸效应充分掌握。

目前国内外已对 UHPC 抗压性能及尺寸效应进行了一些研究，初步提出了抗压强度的尺寸效应律。马恺泽等[11]、水亮亮等[12]、张立军等[13]和陈宝春[14]等试验研究了钢纤维体积掺量、外加剂类型和养护方式等对 UHPC 立方体抗压强度及轴心抗压强度尺寸效应的影响，发现增大钢纤维掺量、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[15]通过对不同钢纤维类型和掺量，水胶比在 0.16 至 0.2 范围内 UHPC 抗压强度进行抗压强度尺寸效应试验，提出采用端勾型钢纤维可大幅降低 UHPC 抗压强度的尺寸效应。在 UHPC 抗拉及抗弯性能尺寸效应研究方面，Reineck 等[16]基于试验结果提出 UHPC 小梁试件的高宽比可显著影响其抗折强度的尺寸效应。Nguyen 等[17]、Malmud 等[18]和安明喆等[19]等完成了不同尺寸矩形小梁试件的弯折试验，分析了纤维掺量和纤维类型等因素对抗折强度及弯曲韧性尺寸效应的影响。

UHPC 材料具有较高的抗拉强度，研究成果[20]表明在结构分析中可充分利用其受拉性能从而有效提高构件承载能力。如何合理考虑尺寸效应影响，确定大尺寸实际构件中 UHPC 材料受性能拉对结构承载力有效提高作用，使得对 UHPC 抗拉性能尺寸效应的研究显得尤为重要。抗折强度是材料受拉性能重要指标，目前关于 UHPC 抗折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。已有研究[15]表明 UHPC 强度及尺寸效应与包括混凝土强度等级、水胶比、钢纤维种类与掺量等众多因素有关。因此，本工作对 UHPC 抗折强度及尺寸效应进行系统的试验研究，分析钢纤维类型和掺量及强度等级等对尺寸效应的影响，建立 UHPC 抗折强度的尺寸效应律。

1　实验

1.1　样品制备

普通硅酸盐水泥，强度等级 52.5，3、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。I 级超细粉煤灰，SiO_2 含量为 56.1%，比表面积为 693 m^2/kg。超细矿渣粉，比表面积为 811 m^2/kg。细骨料为最大粒径 1.25 mm 天然河沙和采用 300 目精制石英粉。自来水。减水剂：采用聚羧酸高效减水剂，减水率为 34%。端钩形和平直型纤维，长度均为 13 mm，等效直径 0.2 mm，长径比为 65。

纤维体积掺量分别为 0、1%、2%和 3%。分别按水胶比 0.16、0.18 和 0.20 制备强度等级为 R120 级、R140 级和 R160 级 UHPC 试件，见表 1。每一强度等级和钢纤维类型及掺量的试件制备 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，每一规格试件制备了 5 个。

各规格试件混凝土配合比如表 1 所示。表 1 中抗压强度为 3 块掺入 2%平直型钢纤维，边长 100 mm 立方体试件抗压度实测值的平均值。

试验前对搅拌机进行预湿。搅拌不同组混凝土前，及时清洗搅拌机。为避免钢纤维成团，在搅拌的过程中多次少量加入；每组混凝土搅拌时长和振捣时长保持一致。试验制作流程为：将胶凝材料和细骨料投入搅拌机干拌 3 min；加入减水剂，继续干拌 2 min。加入水后湿拌 6 min。最后加入钢纤维，继续搅拌 6 min。将搅拌好的 UHPC 装入试模，置于振动台上震动 1 min 成型。

表 1　超高性能混凝土配合比

Table 1　Mix proportion of UHPC (ultra-high performance concrete)

Strength grade	Mix proportion (mass ratio)						*w*(water reducer)/%	Water binder ratio	Compressive strength/MPa
	Cement	Silica fume	Fly ash	Slag	Sand	Quartz powder			
R120	1.00	0.20	0.10	0.10	1.10	0.35	2.50	0.20	133.4
R140	1.00	0.20	0.10	0.10	1.10	0.35	2.50	0.18	155.1
R160	1.00	0.20	0.10	0.10	1.10	0.35	2.50	0.16	179.3

w is mass fraction; Volume fraction of straight steel fiber is 2%; Size of specimen is 100 mm×100 mm×100 mm.

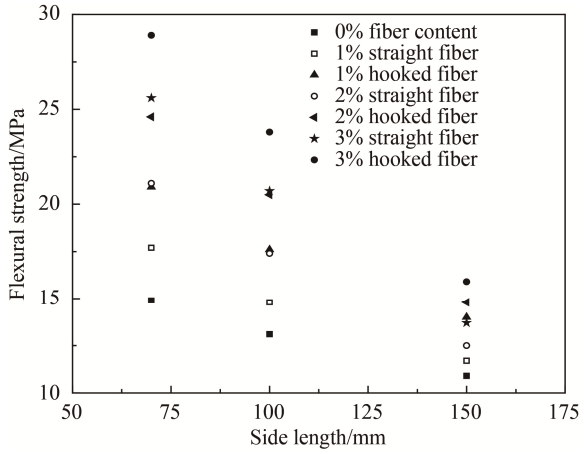
1.2　测试

试件成型后在标准养护室养护 48 h，再泡入 90 ℃热水继续热养护 48 h。UHPC 抗折试验按照 GB/T 313027—2015 标准[10]进行。加载前试件首先标记支撑和加载的位置，然后加载至试件破坏为止，加载速率为 0.1 MPa/s。

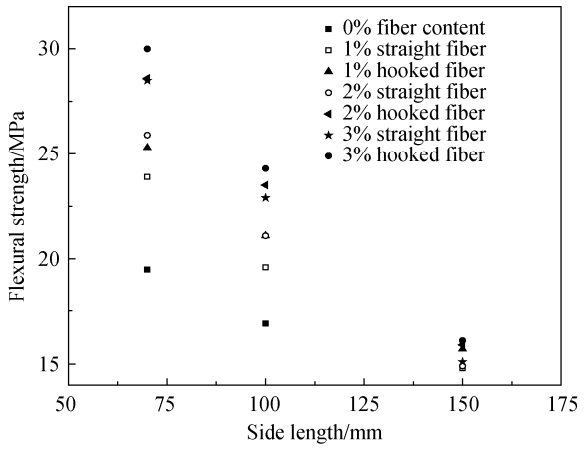
2 结果与讨论

2.1 抗折强度

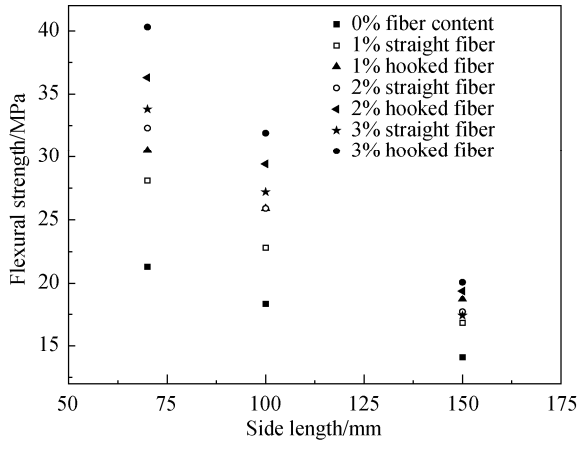
图 1 为 UHPC 小梁试件抗折强度值。经对实测抗折强度值进行统计分析可知，各规格件抗折强度标准差范围为 0.41 MPa 至 1.02 MPa，变异系数范围为 1.1%~3.6%，表明本试验结果离散性较小。根据我国现行 UHPC 规范[10]，抗折强度试验采用的标准尺寸试件为 100 mm×100 mm×400 mm 小梁试件。从图 1 可以看出：UHPC 基体(钢纤维掺量为 0 时)抗折强度随混凝土强度等级的提高逐渐增大，R140 级和 R160 级 UHPC 基体抗折强度分别比 R120 级提高了约 29%和 39.7%。钢纤维可有效提高小梁试件的弯曲韧性，强度等级为 R140 级，配置体积掺量分别为 1%、2%和 3%平直型钢纤维小梁试件的抗折强度依次为未配置钢纤维试件的 1.16 倍、1.25 倍和 1.36 倍。由于端勾型纤维与 UHPC 基体的锚固性能比平直型更好，故同掺量条件下采用端勾型钢纤维试件的抗折强度较高，约为采用平直型钢纤维试件强度的 1.1 倍。



(a) R120



(b) R140



(c) R160

图 1 超高性能混凝土(UHPC)抗折强度实测值

Fig. 1 Flexural strengths tested of UHPC samples

由图 1 可见：3 个强度等级的 UHPC 小梁试件均具有一定程度的尺寸效应现象，表现为 UHPC 抗折强度随试件几何尺寸的增大具有逐渐降低的趋势。

2.2 尺寸效应

2.2.1 强度等级对尺寸效应的影响 参照文献[21]，引入尺寸效应度定量地表征 UHPC 抗折强度尺寸效应的大小。为便于尺寸效应分析，以尺寸最小的试件，即短边尺寸为 70 mm 的小梁试件为参考试件，定义另外 2 种尺寸试件抗折强度与参考试件抗折强度差值占参考试件抗折强度的百分比为尺寸效应度：

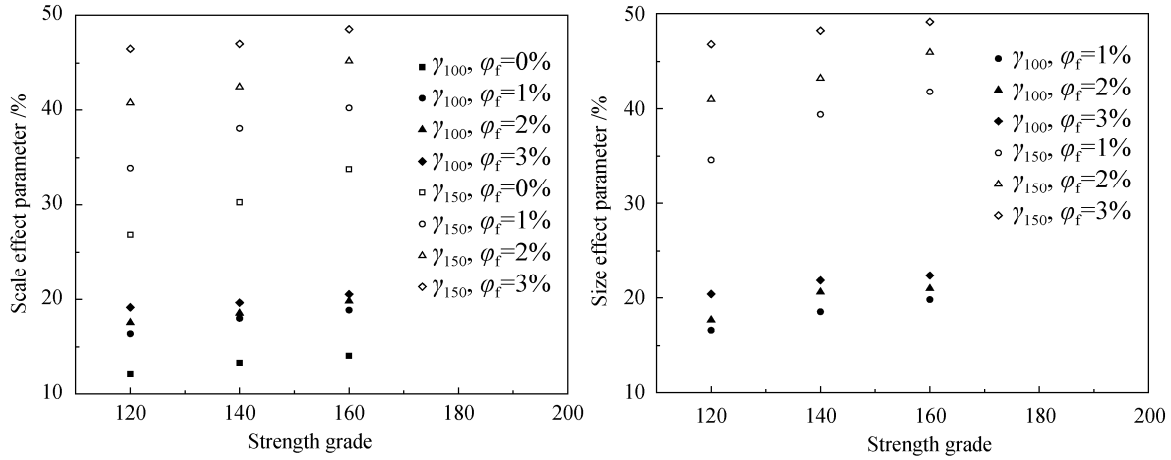
$$\gamma_{100}=\frac{f_{70}-f_{100}}{f_{70}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\gamma_{150}=\frac{f_{70}-f_{150}}{f_{70}}\times 100\% \tag{2}$$

其中，f_{70}、f_{100} 和 f_{150} 分别为短边长 70、100 mm 和 150 mm 小梁试件的抗折强度值，MPa。

由尺寸效应度 γ 的定义可知，尺寸效应度 γ 值越大表明不同尺寸试件抗折强度相差越大，UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应越明显。根据试验结果，计算得到各规格 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ 值，并将其随强度等级变化规律绘于图 2。

由图 2 可见：随着 UHPC 强度等级的提高，各规格小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ 有增大的趋势。当未配置钢纤维时，强度等级为 R160 级小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ_{100} 和 γ_{150} 分别约为 R140 级小梁试件的 1.06 倍与 1.12 倍，约为 R120 级小梁试件相应值的 1.17 和 1.26 倍。统计尺寸效应理论认



(a) Straight fiber　　(b) Hooked fiber

φ_f is volume fraction of steel fiber.

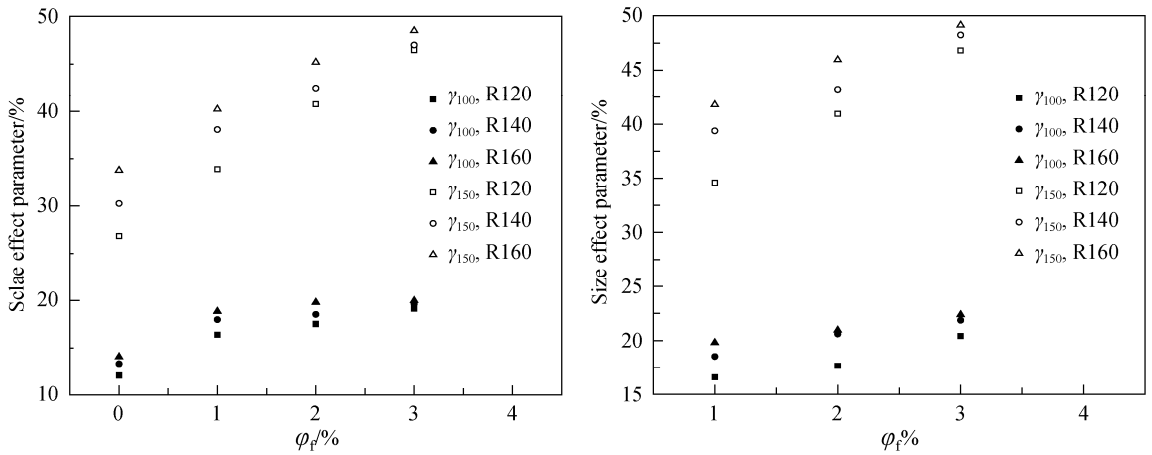
图 2　不同强度等级 UHPC 抗折强度尺寸效应度

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

为试件内不均匀强度单元是产生尺寸效应的根本原因，低强度单元出现几率与尺寸效应呈正比关系。当强度等级较高时，UHPC 配合比中水胶比较小，其流动性比低强度等级试件更低，造成试件内未完全水化颗粒和浇筑欠密实导致的微裂纹等初始缺陷更多，其抗折强度的尺寸效应更为明显。此外，高强度等级试件水化热较高，试件内温度分布梯度较大，使得存在温致裂纹的几率较低强度等级试件更高，增强了尺寸效应。从能量释放的角度而言，随着强度等级的提高，未配置钢纤维 UHPC 基体的脆性明显增大，破坏时耗散的断裂能也较少，其尺寸效应越显著。

R160 级配置体积掺量为 1%、2%和 3%的平直型钢纤维小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ_{100} 分别约为 R120 级相应试件的 1.15 倍、1.13 倍和 1.03 倍，抗折强度尺寸效应度 γ_{150} 依次为 R120 级试件的 1.18 倍、1.11 倍和 1.05 倍，较未配钢纤维试件降低了约 10%。这是由于配置钢纤维试件在加载过程中，UHPC 基体达到抗拉强度失效卸载的同时钢纤维可承受更多荷载，具有应力重分布现象，削弱了由低强度单元导致的尺寸效应。此外，配置钢纤维小梁试件的延性明显增大，且钢纤维的“桥接作用”改善了裂缝的形成和发展进程，增大了断裂韧性，使得强度等级对试件抗折强度尺寸效应的影响明显减弱。

2.2.2　钢纤维类型和掺量对尺寸效应的影响　　图 3 为不同钢纤维掺量 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ_{100} 和 γ_{150}。



(a) Straight fiber　　(b) Hooked fiber

图 3　不同钢纤维掺量 UHPC 抗折强度尺寸效应度

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

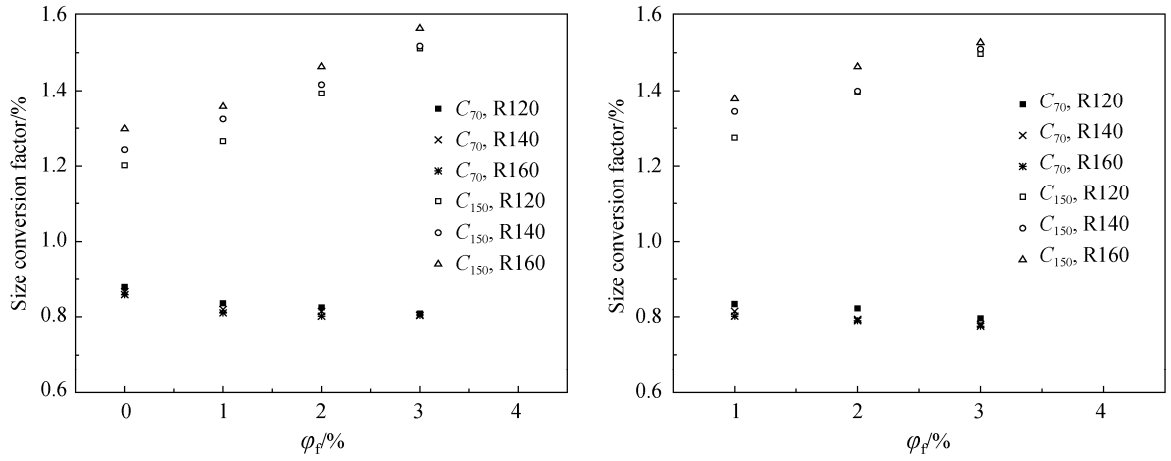
从图 3 可见：添加钢纤维使得 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应度明显增大。掺入 1%，2%和 3%平直型钢纤维的 R120 级 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ_{100} 比未掺加钢纤维的 UHPC 小梁试件分别提高了 35%，45%和 58%，抗折强度尺寸效应 γ_{150} 度增大了 26%、51%和 71%。端勾型钢纤维掺量为 1%，2%和 3%的 R120 级 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应度 γ_{100} 为未掺加钢纤维的 UHPC 的 1.29 倍、1.46 倍和 1.69 倍，尺寸效应度 γ_{150} 为 1.37 倍、1.53 倍和 1.78 倍，变化规律与罗晨熙[15]的研究结果一致。原因是试件浇筑振捣时，接近试件表面的钢纤维由于受到试模壁的阻碍作用，改变其杂乱分布的状态而呈现出平行于试件表面的取向。这种钢纤维取向像“箍筋”一样对试件产生约束增强作用，即边壁效应[17]，试件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。平直型纤维主要通过与 UHPC 基体间的摩擦形成粘结作用，端钩型钢纤维除摩擦外，端部提供了额外的锚固，使得其与 UHPC 基体的黏结性能明显优于平直型钢纤维，边壁效应更强从而尺寸效应更显著。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，增强了抗折强度的尺寸效应。

2.2.3 UHPC 抗折强度尺寸换算系数 采用尺寸效应度指标 γ 可直观定量描述材料力学性能的尺寸效应，但其缺点在于需要确定一个参考(基准)试件，多为研究对象中几何尺寸最大或最小的试件。目前国内外材料性能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/非标准试件力学性能参数间的换算关系。参照文献[14，19]和我国现行规范[10]，以 100 mm×100 mm×400 mm 为标准试件，定义非标准试件抗折强度与标准试件抗折强度的比值为尺寸换算系数：

$$C_{70} = f_{100} / f_{70} \tag{3}$$

$$C_{150} = f_{100} / f_{150} \tag{4}$$

由尺寸换算系数定义可知，其值偏离 1 的程度越大表明尺寸效应越明显。根据试验结果，按式(3)和式(4)计算得到各规格 UHPC 小梁试件尺寸换算系数如图 4 所示。



(a) Straight fiber (b) Hooked fiber

图 4 UHPC 抗折强度尺寸效应换算系数

Fig. 4 Size conversion factors for flexural strengths of UHPC samples

由图 4 可见：随着钢纤维掺量的提高，尺寸效应有所增强，UHPC 抗折强度尺寸换算系数 C_{70} 和 C_{150} 分别呈降低和升高的趋势。掺加 3%平直型钢纤维的 R140 级 UHPC 抗折强度尺寸换算系数约为 1%钢纤维掺量 UHPC 试件的 98%和 114%。钢纤维类型对 UHPC 尺寸换算系数影响较小，同掺量条件下，采用端勾型钢纤维 UHPC 试件的尺寸换算系数约为采用平直型钢纤维 UHPC 试件的 98%和 103%。因此，可偏于安全地将各纤维掺量平直型钢纤维 UHPC 抗折强度尺寸换算系数值取为采用 3%端勾型钢纤维 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_{70} 和 C_{150} 分别约为 R120 级 UHPC 基体的 0.97 倍和 1.08 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%R160 级 UHPC 抗折强度尺寸换算系数 C_{70} 和 C_{150} 分别约为 R120 级的 0.99 倍和 1.03 倍。

收集国内外 UHPC 抗折试验结果[11–13,15–19]，结

合实测抗折强度，将各规格 UHPC 抗折强度换算系数进行修正，结果列于表 2。由表 2 数据可知，当强度等级较高时，UHPC 抗折强度尺寸换算系数 C_{70} 为 0.791，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 0.85，表明 UHPC 抗折强度的尺寸效应强于普通混凝土。

表 2　UHPC 抗折强度尺寸换算系数值

Table 2　Value of size conversion factor on the flexural strength σ of UHPC　　σ/MPa

Conversion factor	R120	R140	R160
C_{70}	0.809	0.802	0.791
C_{150}	1.508	1.514	1.558

2.3　尺寸效应律

为了解释尺寸效应产生的原因，美国西北大学 Bazant 教授将断裂力学理论引入到混凝土尺寸效应的研究当中。他认为混凝土材料存在尺寸效应的原因是：在结构达到最大荷载前，一条主裂缝或含有大量微裂缝的区域的稳定扩展，这个过程中伴随着断裂能的释放，即尺寸效应是由裂缝扩展时断裂能的释放引起的[19]。基于以上认识，对于无初始切口的小梁试件，他提出了与结构尺寸 D 和名义强度 σ_N 有关的计算公式，即 Bazant 尺寸效应律公式，如下：

$$\sigma_N = \sigma_\infty \left(1 + \frac{D_b}{D}\right) \tag{5}$$

式中：σ_∞ 为几何尺寸无穷大时，结构的名义强度值，MPa；D_b 为特征尺寸，mm。

以往的研究[22–24]表明，上式对普通混凝土抗折强度有较好的适用性，为验证上式对于 UHPC 材料中的适用性，收集文献[11–13,15–19]和本实验总计 350 组强度等级为 R100 至 R160，短边长为 70 mm 至 150 mm，钢纤维掺量范围为 0~3%的 UHPC 小梁试件抗折强度数据拟合上述公式。

通过计算，得到不同钢纤维类型和掺量 UHPC 抗折强度尺寸效应律计算式(5)中名义强度 σ_∞ 和特征尺寸 D_b 的值分别列于表 3 和表 4。所收集到的数据和式(5)计算结果相关系数约为 0.96，表明二者吻合较好，可用式(5)分析计算不同尺寸 UHPC 小梁试件的抗折强度。

对表 3 和表 4 中数据进行整理，得到公式(5)中名义强度 σ_∞ 和特征尺寸 D_b 与钢纤维类型和钢纤维掺量的关系式如式(6)至式(9)。采用式(5)至式(9)可对不同钢纤维类型和掺量的 UHPC 小梁试件抗折强度尺寸效应律参数进行计算。

表 3　配置平直型钢纤维尺寸效应公式参数值

Table 3　Parameters in the scale effect equation with straight fiber

φ_f/%	σ_∞ /MPa			D_b/mm		
	R120	R140	R160	R120	R140	R160
0	7.6	8.8	8.3	68.4	87.5	112.9
1	6.7	7.2	7.4	117.4	164.6	199.3
2	5.5	5.9	5.7	203.6	242.4	330.8
3	4.1	4.3	4.2	377.4	409.9	503.3

φ_f is volume fraction of steel fiber, σ_∞ is nominal strength of UHPC, Db is characteristic dimension of UHPC.

表 4　配置端勾型钢纤维尺寸效应公式参数值

Table 4　Parameters in the scale effect equation with hooked fiber

φ_f/%	σ_∞ /MPa			D_b/mm		
	R120	R140	R160	R120	R140	R160
1	7.7	7.2	7.5	123.8	184.7	233.9
2	6.4	6.1	6.1	207.8	273.8	374.0
3	4.5	3.7	4.2	409.4	526.6	637.1

$$\sigma_\infty = 0.019S - 0.545\varphi_f - 0.006S\varphi_f + 5.638 \tag{6}$$

$$\sigma_\infty = 0.011S - 0.272\varphi_f - 0.008S\varphi_f + 7.003 \tag{7}$$

$$D_b = 1.286S + 10.738\varphi_f + 0.724S\varphi_f - 113.46 \tag{8}$$

$$D_b = 1.156S - 71.125\varphi_f + 1.514S\varphi_f - 103.26 \tag{9}$$

式中：S 为 UHPC 强度等级，MPa；φ_f 为钢纤维体积分数。

3　结论

1) 随强度等级的提高，UHPC 基体抗折强度尺寸效应逐渐增强，R160 级 UHPC 基体抗折强度的尺寸效应约为 R120 级 UHPC 基体的 1.26 倍。

2) 由于边壁效应的影响，高钢纤维掺量 UHPC 抗折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 抗折强度尺寸效应约为掺量 1% 试件的 1.78 倍。

3) 钢纤维类型对 UHPC 抗折强度尺寸效应有一定影响，端勾型纤维 UHPC 试件抗折强度的尺寸效应约为平直型纤维 UHPC 试件的 1.1 倍。

4) 不同钢纤维类型、掺量和 UHPC 强度等级下，采用基于能量释放的 Bazant 尺寸效应理论与实测结果吻合良好。根据拟合结果，提出了 Bazant 理论参数的经验计算公式，拟合结果吻合。

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] 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.

[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 (in Chinese, dissertation). 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), 2019, 47(3): 391–398.

[15] 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, 2018: 18–24.
LUO Chenxi. Study on size effect of basic mechanical properties of ultra high performance concrete (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2018: 18–24.

[16] REINECK K H, FRETTLOHR B. Tests on scale effect of UHPFRC under bending and axial forces[J]. Constr Build Mater, 2016, 142(5): 781–790.

[17] NGUYEN D L, KIM D J, 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.

[18] 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.

[19] 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 Min Technol (in Chinese). 2007, 36(1): 38–42.

[20] 马熙伦, 陈宝春, 黄卿维, 等. 钢纤维掺量对 R-UHPC 梁受弯性能影响的研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 111–120.
MA Xilun, CHEN Baochun, HUANG Qingwei, et al. J Niangxia Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2018, 31(4): 111–120.

[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: 中国标准出版社, 2019.

[22] 杜敏, 金浏, 李冬, 等. 粗骨料粒径对混凝土弯拉强度尺寸效应影响的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 912–918.
DU Min, JIN Liu, Li Dong, et al. J Beijing Univ Technol(in Chinese), 2016, 42(6): 912–918.

[23] 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.

[24] 苏捷, 方志, 杨钻. 混凝土抗折强度尺寸效应的试验研究[J]. 工业建筑, 2012(12): 67–71.
SU Jie, FANG Zhi, YANG Zuan. Ind Constr (in Chinese), 2012(12): 67–71.