第 48 卷第 5 期
2020 年 5 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 5
May，2020

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190604

钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响

杨 简，陈宝春，苏家战

(桥梁技术创新与风险防治国家级国际联合研究中心，福州大学土木工程学院，福州 350108)

摘 要：测试了掺有 3 种不同规格、4 种不同掺量圆直形钢纤维的超高性能混凝土(UHPC)的弹性模量、立方体抗压强度和流动性能，分析了钢纤维几何参数和掺量对 UHPC 弹性模量的影响。结果表明：UHPC 弹性模量、抗压强度随纤维掺量的增加而增大，随纤维的长径比增大而增大；新拌 UHPC 的流动性能则相反。钢纤维的掺入，对 UHPC 弹性模量具有正、负双重效应。纤维本身较高的弹性模量，发挥着正效应；但纤维同时会降低 UHPC 的流动性能，增大孔隙率和内部缺陷，削弱基体弹性模量，发挥负效应；综合呈现正效应。基于试验结果，建立了考虑纤维掺量和几何参数的 UHPC 弹性模量的半经验预测公式。UHPC 弹性模量与抗压强度具有明显的相关性，为此建立了二者关系的经验公式。最后，基于收集到的 42 篇文献中 320 个试验数据，对上述半经验和经验公式进行了验证与修正，以扩大其适用范围。

关键词：超高性能混凝土；钢纤维；弹性模量；抗压强度；估算公式
中图分类号：TU375　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)05–0652–07
网络出版时间：2020–03–06

Effect of Steel Fiber on Elastic Modulus of Ultra-High-Performance Concrete

YANG Jian, *CHEN Baochun*, *SU Jiazhan*
(Technology Innovation and Risk Mitigation of Bridges, National Center for International Research, College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Effects of aspect ratio and volume fraction of straight steel fiber on the modulus of elasticity (MOE), compressive strength, and flowability of ultra-high-performance concrete (UHPC) were investigated. The results show that the MOE and compressive strength of UHPC increase and the flowability of the fresh UHPC decreases with the increase of fiber volume and fiber aspect ratio. Steel fiber has both positive and negative effects on the MOE of UHPC. The positive effect of steel fiber is due to the high elastic modulus of steel fiber itself. The negative effect is caused by the decrease of the MOE of UHPC matrix due to the decrease of the flowability of fresh UHPC and the increase of the porosity and the inner defects after the fibers adding into the matrix. A semi-empirical formula was proposed for predicting the MOE of the UHPC based on the experimental data, comprehensively considering the positive and negative effects of fibers. It is indicated that the MOE of the UHPC could be strongly correlated to the compressive strength.

Keywords: ultra-high-performance concrete; steel fiber; modulus of elasticity; compressive strength; estimation formula

超高性能混凝土(UHPC)具有良好的力学性能和耐久性，符合可持续发展的需要，成为当今土木工程领域研究与应用的热点和前沿[1]。弹性模量是结构设计的重要参数，是 UHPC 研究的重要内容之一。各国相关标准和设计指南中均给出了弹性模量推荐值[2]，但该值从 40 GPa~65 GPa 不等[3–8]。

虽然许多 UHPC 材性研究中均包括弹性模量，但专门的研究不多。UHPC 一般掺有钢纤维(纤维)，它的弹性模量与骨料、水化产物、基体的孔隙构成等有关，还与纤维的掺量和几何参数有关。然而相关研究不多，且大多仅考虑掺量的影响，结论也不尽相同。文献[9]试验表明弹性模量随纤维掺量增加

收稿日期：2019–09–02。　修订日期：2019–10–11。
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFC0705400)。
第一作者：杨 简(1990—)，男，博士研究生。
通信作者：陈宝春(1958—)，男，教授。

Received date: 2019–09–02.　**Revised date:** 2019–10–11.
First author: YANG Jian (1990–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 845175145@qq.com
Correspondent author: CHEN Baochun (1958–), male, Professor.
E-mail: baochunchen@fzu.edu.cn

而增加。文献[10]试验也发现弹性模量随纤维掺量增加而增大，但掺量超过 3.1%后增加不显著。文献[11]试验发现当纤维的掺量达到 4%时弹性模量值减小。关于纤维几何参数对弹性模量影响的研究更少，且结果不理想。文献[12]对比长径比为 74 和 80 的两种纤维，在 0，1%，2%和 3%掺量时 UHPC 的弹性模量，发现弹性模量值没有显著变化。然而文献[13]试验结果表明掺入 2%纤维时，弹性模量提高了 6%。因此，有必要开展专门的研究，以探讨纤维掺量及几何参数对 UHPC 弹性模量的影响。

为便于工程应用，规范或指南中一般还给出弹性模量与抗压强度的关系式，用于弹性模量的估算。许多学者也给出了各自的相关公式[3–4, 9, 14–16]，但现有的估算公式各不相同，且形式上与我国混凝土弹性模量估算公式差异较大，不符合我国工程应用的习惯。因此，有必要对弹性模量与抗压强度的关系式开展更深入的研究。

以常用的圆直形钢纤维为研究对象，3 种长径比、4 种掺量共计 10 组 UHPC 被用于弹性模量、立方体抗压强度(抗压强度)和流动性能的试验。分析了纤维的掺量和几何参数对 UHPC 弹性模量、抗压强度和流动性能的影响。基于试验结果，提出以纤维体积率和长径比为参数、以基体弹性模量为基础的 UHPC 弹性模量半经验预测公式。同时，建立 UHPC 弹性模量与抗压强度的经验公式。在此基础上，收集大量相关文献中的数据，对上述两个公式进行验证与修正，以扩大适用范围。

1　实验

1.1　纤维设计

采用镀铜圆直形微细钢纤维(ϕ 0.3 mm×13 mm、ϕ 0.2 mm×13 mm、ϕ 0.2 mm×20 mm，简称纤维)，弹性模量为 210 GPa，拉伸强度≥2 700 MPa。以“U 纤维直径与长度-纤维掺量”来表示 UHPC 试验组，例如：掺加 2%的直径为 0.3 mm、长度为 13 mm 的纤维的 U0313-2 试验组，不掺纤维的 U-0 试验组，详见表 1。同组试件一起浇筑，出料时取样进行流动性能测试。

1.2　基体配合比和材料

采用统一基体配合比，见表 2。组成材料有：P•O•52.5 普通硅酸盐水泥；SiO_2 含量大于等于 90%、比表面积为 18 920 m^2/kg、密度 2.0 g/cm^3 的硅灰；根据紧密堆积理论的设计石英砂采用 10~70 目(粒径 212~1 700 μm)，石英粉采用 400 目(粒径 38 μm)；减水率≥25%的 CX-8 聚羧酸高效减水剂。水胶比为水与水泥、硅灰质量合之比，值为 0.18。通过紧密堆积和减少用水量，减少孔隙提高强度与耐久性。

1.3　试件制作与试验方法

UHPC 采用 SJD-60L 强制式混凝土单卧轴搅拌机制备。先将除纤维以外的干料投入搅拌机搅拌 5 min，加入水和减水剂的混合液继续搅拌至形成浆体，最后由过筛分散的方式逐渐添加钢纤维，添加完成后再搅拌 5 min 出料入模具；总的搅拌时间控制在 15~18 min 以内。出料时取样进行流动性能测试。

表 1　钢纤维类型和用量

Table 1　Type and volume fraction of steel fiber

Sample No.	d_f/mm	l_f/mm	V_f/%
U-0			0
U0313-1	0.3	13	1
U0313-2	0.3	13	2
U0313-3	0.3	13	3
U0213-1	0.2	13	1
U0213-2	0.2	13	2
U0213-3	0.2	13	3
U0220-1	0.2	20	1
U0220-2	0.2	20	2
U0220-3	0.2	20	3

d_f: Diameter of fiber; l_f: Length of fiber; V_f: Volume fraction.

表 2　基体配比(质量比)

Table 2　Mixture proportion of matrix (mass ratio)

Binder (B)		Aggregate		Super-plasticizer (SP)	Water/binder (W/B) ratio
Cement (C)	Silica fume (SF)	Quartz sand (S)	Quartz powder (P)		
1	0.3	1.08	0.09	0.025	0.18

流动性能试验采用 NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪进行，设备跳动频率为 1/s，每次测试跳动 20 次，跳动完毕后用卡尺测量 UHPC 在相互垂直的两个方向的扩散直径，取均值作为扩展度，以扩展度作为流动性能参数。流动性测试应在取样后的 6 min 之内完成，测试精度为 5 mm，扩展度取值范围为 100~300 mm。

养护制度为常温 8~12 h 脱模，而后进行 72 h 的 90 ℃蒸汽养护，常温养护至第 28 d，根据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)规定[8]进行弹性模量和抗压强度试验。

抗压强度试件采用 100 mm 立方体；3%掺量试

件测试在 5 000 kN 压力机上进行，其它在 2 000 kN 压力机；加载速率控制在 1.2~1.4 MPa/s；取每组 3 个试件测试的均值作为该组抗压强度。

弹性模量试件采用 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体；试验在 2 000 kN 的压力机上进行；加载速率为 1.2 MPa/s。试验分两个部分进行，每组 3 个试件测试轴心抗压强度。余下 3 个进行弹性模量测试，以 0.5 MPa 为基准荷载，1/3 轴心抗压强度为加载上限；试验时 1 次对中、2 次预载，3 个加卸载循环后，第 3 个循环卸载至基准荷载后恒载 60 s 记录应力、应变，然后均匀地加载至加载上限值恒载 60 s，记录应力、应变，应力增量与应变增量的比值为试件弹性模量，取 3 个试件的均值为弹性模量值。

2 结果与讨论

2.1 弹性模量与抗压强度

表 3 为 UHPC 试件的弹性模量与抗压强度。弹性模量随纤维掺量和长径比的增加而增大，见图 1。3 种纤维在掺量超过 2%后，弹性模量增长趋势均减缓。抗压强度与纤维掺量的关系曲线见图 2。它受纤维掺量和长径比的影响规律与弹性模量相似，间接表明弹性模量与抗压强度之间存在着一定的对应关系。不同的是，仅 U0313 和 U0213 在纤维掺量超过 2%，抗压强度增长趋势下降。

2.2 流动性能

当纤维掺量较小时(小于 2%)，纤维随基体扩展自然流动，分布均匀，结团少，孔隙缺陷少，新浇 UHPC 流动性能良好；当掺量较大时(3%)，纤维结团增多，分布均匀性下降，内部孔隙缺陷增加，新浇 UHPC 流动性能下降。

扩展度值见图 3。随纤维掺量和长径比的增加，扩展度降低。纤维掺量是主导因素。长径比的影响随着纤维掺量的增大而明显。

研究表明，新拌 UHPC 的流动性能不仅影响施工性能，而且影响硬化后的力学性能[10–11]。流动性能差，基体孔隙和缺陷增多，对基体的抗压强度和弹性模量有负效应。由试验结果可知，纤维掺量 3%时，扩展度值显著下降，导致弹性模量和抗压强度随纤维增加的增长趋势趋缓。

表 3 UHPC 的弹性模量和抗压强度

Table 3 MOE and compressive strength of UHPC

UHPC sample	MOE *E*/GPa					Compressive strength/MPa
	1	2	3	Mean	Standard deviation	
U-0	44.6	44.2	46.6	45.1	1.05	135.2
U0313-1	45.7	45.7	42.3	44.5	1.60	139.7
U0313-2	45.8	46.8	44.6	45.8	0.90	157.3
U0313-3	46.2	46.2	46.4	46.3	0.12	158.1
U0213-1	44.6	45.6	48.1	46.1	1.50	145.0
U0213-2	44.2	48.9	50.2	47.8	2.60	162.6
U0213-3	48.1	46.8	51.4	48.8	1.96	168.7
U0220-1	47.2	48.3	45.2	46.9	1.25	157.8
U0220-2	46.3	48.5	50.9	48.6	1.88	172.3
U0220-3	47.8	48.3	51.5	49.2	1.63	192.2

MOE: Modulus of elasticity.

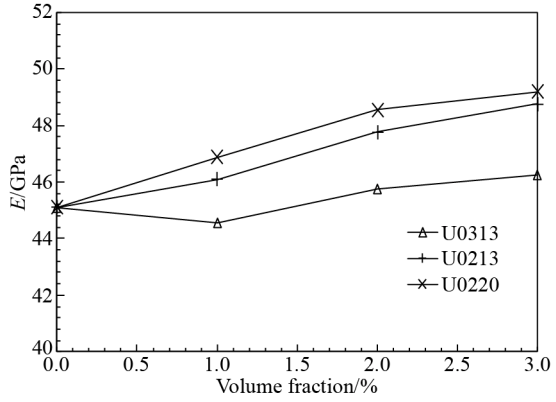


图 1 弹性模量与纤维掺量的关系

Fig. 1 Relationship between MOE of UHPC and volume fraction of fiber

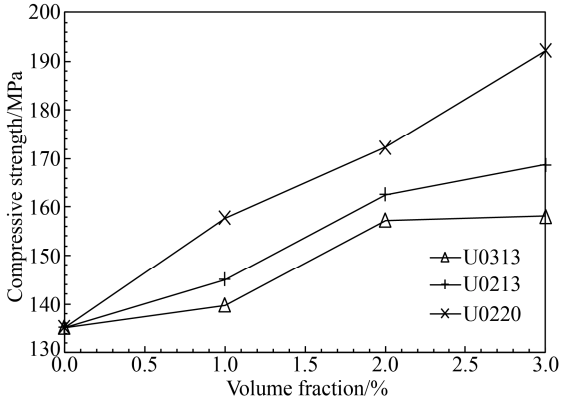


图 2 抗压强度与纤维掺量的关系

Fig. 2 Relationship between compressive strength of UHPC and volume fraction of fiber

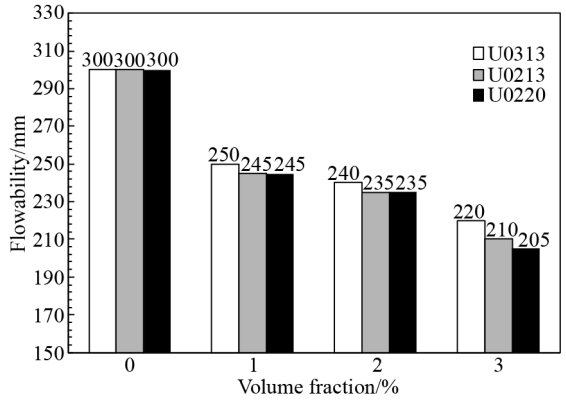


图 3　纤维对流动性能的影响
Fig. 3　Effect of fiber on flowability

3　钢纤维对弹性模量的影响

3.1　弹性模量与纤维参数的关系

将 UHPC 视作纤维与基体的二相复合材料，截面抗压刚度由二者叠加而成，见式(1)。

$$E_{\mathrm{u}}A_{\mathrm{u}} = E_{\mathrm{f}}A_{\mathrm{f}} + \eta E_{\mathrm{m}}A_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中，E_{u}、E_{m}和 E_{f}为 UHPC、基体和纤维的弹性模量(GPa)；A_{u}、A_{m}和 A_{f}为 UHPC、基体和纤维的截面积(mm^2)；η 为纤维对基体弹性模量的折减系数。

右侧第 1 项代表了纤维自身较高的弹性模量对 UHPC 弹性模量增大的正效应；第 2 项中的折减系数 η 反映纤维掺入带来流动性能下降、内部孔隙和缺陷增多削弱基体的负效应。

假定钢纤维分布均匀，式(1)两边同除 A_{u}，得式(2)，它是以基体弹性模量为基础，纤维掺量和弹性模量的函数。

$$E_{\mathrm{u}} = E_{\mathrm{f}}V_{\mathrm{f}} + \eta E_{\mathrm{m}}(1-V_{\mathrm{f}}) \tag{2}$$

式中，V_{f}为纤维掺量(体积率)。

3.2　弹性模量估算公式

由 2.2 节可知，UHPC 流动性能受到纤维的掺量和几何参数的共同影响。因此，式(2)中 η 应为纤维掺量和长径比的函数。然而，现有的研究尚不能从理论上建立起流动性能与 UHPC 弹性模量之间的关系，因此，假定纤维对弹性模量的折减系数可用式(3)表达。

$$\eta = 1-\beta\frac{l_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{f}}}V_{\mathrm{f}} \tag{3}$$

式中：β 为影响系数；l_{f}、d_{f}为钢纤维的长度和直径(mm)。

试验数据进行数理回归，得 β 为 0.005，得式(4)。式(4)估算的误差的均值为 1.6%，标准差为 2.6%，吻合良好，表明式(3)所构建的关系是可行的。

$$E_{\mathrm{u}} = E_{\mathrm{f}}V_{\mathrm{f}} + (1-0.005\frac{l_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{f}}}V_{\mathrm{f}})E_{\mathrm{m}}(1-V_{\mathrm{f}});$$
$$43 \leqslant l_{\mathrm{f}}/d_{\mathrm{f}} \leqslant 100,\ 0 \leqslant V_{\mathrm{f}} \leqslant 3\% \tag{4}$$

式(4)是基于单一基体试验的结果。为验证在不同的基体条件下，式(4)依然成立，从收集到的文献中选取 9 篇[9, 11–13, 17–21]涉及不同基体的文献，共计 76 组数据，应用式(4)进行估算，并与文献数据进行对比，见图 4。估算误差的误差均值为–0.6%，标准差为 8.7%，90.8%的数据点落在误差±15%范围内。表明不同基体时，式(4)仍有较好的估算精度。

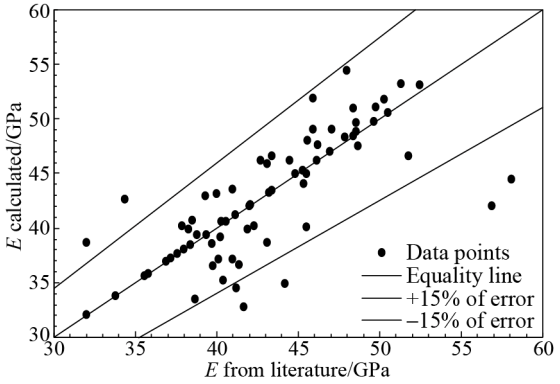


图 4 式(4)预测结果与文献数据对比
Fig. 4　Comparison of Eq.(4) with literatures data

为拓展应用范围和提高精度，将文献中的 76 组数据与本实验 10 组数据汇总后，重新进行统计分析，得到式(5)，其估算的误差的均值为–0.4%，标准差为 8.1%，精度得到进一步提高。

$$E_{\mathrm{u}} = E_{\mathrm{f}}V_{\mathrm{f}} + (1-0.006\frac{l_{\mathrm{f}}}{d_{\mathrm{f}}}V_{\mathrm{f}})E_{m}(1-V_{\mathrm{f}});$$
$$43 \leqslant l_{\mathrm{f}}/d_{\mathrm{f}} \leqslant 136,\ 0 \leqslant V_{\mathrm{f}} \leqslant 6\% \tag{5}$$

4　弹性模量与抗压强度的关系

4.1　现有的关系式

我国《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)[22]提供弹性模量与抗压强度关系式，见式(6)。适用范围为抗压强度属于(15~80 MPa)的混凝土。

$$E_{\mathrm{u}} = \frac{100}{2.2+\frac{34.7}{f_{\mathrm{c}}}};\ 15\ \mathrm{MPa} \leqslant f_{\mathrm{c}} \leqslant 80\ \mathrm{MPa} \tag{6}$$

式中：f_{c}为 UHPC 抗压强度值(MPa)。

研究表明，抗压强度与弹性模量具有相关性，但抗压强度越高弹性模量增长趋势越缓[23]。一般而言，UHPC 抗压强度大于 120 MPa[2]，因此式(6)不

适用于 UHPC。收集现有 UHPC 弹性模量与抗压强度的部分关系式，见表 4。国内外抗压强度测试试件不尽相同，根据文献[2]提出的不同试件间抗压强度换算关系，对表 4 各式进行修正，然后估算试验结果，估算误差的误差均值、标准差列于表 4 的最后两列。各式误差均值范围为 4.5%~28.3%，精度可进一步提高。

4.2 经验公式

由表 4 可知，尽管各式不尽相同，但函数形式相同，见式(13)。

$$E_{\mathrm{u}} = a(f_{\mathrm{c}})^{b} \tag{13}$$

式中，a，b 为待定参数。

应用表 3 的试验结果对式(13)进行数据回归，得经验公式(14)。它的估算结果与试验值的误差的均值为–0.6%、标准差为 1.9%，预测效果好于表 4 中的所有公式。

$$E_{\mathrm{u}} = 3.75(f_{\mathrm{c}})^{0.5} \tag{14}$$

式(14)的形式与我国现有混凝土弹性模量估算公式不同，不符合我国工程师应用习惯；根据式(6)，采用式(15)的函数形式。

$$E_{\mathrm{u}} = \frac{100}{c + \dfrac{d}{f_{\mathrm{c}}}} \tag{15}$$

式中，c，d 为待定参数。

应用表 3 的试验结果对式(15)进行数据回归，得经验公式(16)。其估算结果与试验值误差的均值为 0.5%、标准差为 0.8%，估算精度优于表 4 各式。

$$E_{\mathrm{u}} = \frac{100}{1.42 + \dfrac{108}{f_{\mathrm{c}}}};\ 43 \leqslant l_{\mathrm{f}}/d_{\mathrm{f}} \leqslant 100,\ 0 \leqslant V_{\mathrm{f}} \leqslant 3\% \tag{16}$$

表 4 弹性模量计算公式收集

Table 4 Collected calculation equation of MOE

Reference	f_c/MPa	Sample number	Formula	Error analysis	
				Mean/%	Standard deviation/%
NF P 18-710[3]	⩾140	7	E_u=9.5(f_c)$^{1/3}$	9.1	0.8
FHWA[4]	126⩽f_c⩽193	8	E_u=3.84(f_c)$^{1/3}$	5.6	2.1
Ali Alsalman[9]	31⩽f_c⩽235	9	E_u=8.01(f_c)$^{1/3}$	7.7	0.9
Sritharan[14]	170	10	E_u=4.153(f_c)$^{1/3}$	14.2	2.3
Ma J[15]	150⩽f_c⩽180	11	E_u=19(f_c/10)$^{1/3}$	4.5	0.8
Kollmorgen[16]	34⩽f_c⩽207	12	E_u=11.8(f_c)$^{1/3}$	28.3	1.0

E_{u}: Modulus of elasticity; f_c: Compressive strength.

4.3 经验公式的验证与修正

试验仅采用一种基体，且样本数量有限。为验证式(16)是否具有广泛的适用性，所收集到 42 篇[9, 11–13, 17–21, 24–56]相关文献的 320 个数据。各国标准中 UHPC 的最低抗压强度值和强度测试试件不尽相同，按文献[2]进行抗压强度换算，截取超过 120 MPa 的 295 个数据作为样本。

对比式(16)估算结果与样本数据，见图 5。估算误差的均值为–0.9%，标准差为 12.9%，77.0%的样本数据点落在了±15%的误差范围内，具有较好的精度。

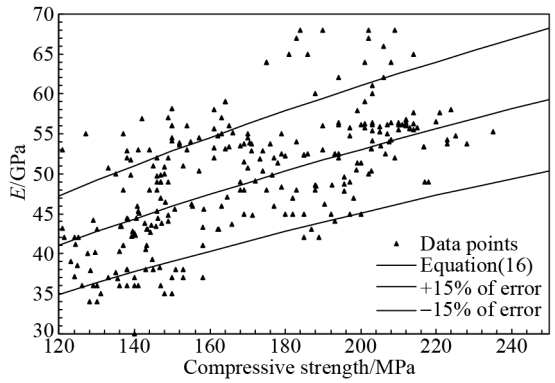


图 5 式(16)预测结果与试验值对比

Fig. 5 Comparison of Equation (16) with literatures data

为进一步提高精度和拓展应用范围，结合样本数据与试验数据进行统计分析，得式(17)。其估算误差的均值为 0.1%，标准差为 12.9%，77.4%的样本数据点落在了±15%的误差范围内，预测的精度得到进一步提高。

$$E_{\mathrm{u}} = \frac{100}{1.4 + \dfrac{108}{f_{\mathrm{c}}}};\ 30 \leqslant l_{\mathrm{f}}/d_{\mathrm{f}} \leqslant 136,\ 0 \leqslant V_{\mathrm{f}} \leqslant 6\% \tag{17}$$

5 结论

1) 掺钢纤维的 UHPC 弹性模量受到纤维掺量和长径比的共同影响，弹性模量随纤维掺量和长径比的增加而增大。

2) 新拌 UHPC 的流动性能随纤维掺量和长径比的增加而降低，前者为主导因素。纤维掺量较大时(3%)，流动性能下降，有少量纤维结团出现，纤维分布均匀性下降，UHPC 基体孔隙和缺陷增多，

弹性模量增长趋势变缓。因此，在建立 UHPC 弹性模量与纤维关系时，应考虑此项负效应的影响。

3) 建立的考虑纤维掺量和几何参数的 UHPC 弹性模量的半经验预测公式(4)，具有较高的精度，得到文献资料相关的数据验证。在此基础上的修正后的公式(5)，有更好的适用性。

4) 钢纤维对 UHPC 抗压强度的影响，具有与对弹性模量影响相似的规律。弹性模量与抗压强度之间具有较强的相关性。回归得到以 UHPC 强度估算其弹性模量的两个公式，均具有较好的精度。其中，公式(16)采用与我国现有混凝土弹性模量估算公式相同的形式，便于我国工程师的应用。该式得到大量文献试验数据的验证，经修正后的式(17)，精度得到进一步提高。

参考文献:

[1] 陈宝春, 韦建刚, 苏家战, 等. 超高性能混凝土(UHPC)应用进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 10–20.
CHEN Baochun,WEI Jiangang, SU Jiazhan, et al. J Arch Civ Eng (in Chinese), 2019, 36(2): 10–20.

[2] 陈宝春, 杨简, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土形状与尺寸效应分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019(3): 391–397.
CHEN Baochun, YANG Jian, HUANG Qinwei, et al. J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2019, 47(3): 391–397.

[3] AFNOR N F. P18–710 Specific rules for ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC)[S]. France: European Committee for Standardization, 2016.

[4] Federal highway Administration (FHWA). design guide for Precast Uhpc Waffle Deck Panel System, Including Connections[M]. United States, 2013.

[5] SIA 2052. Bétons fibrés ultra-performant: Matériaux, dimensionnement et exécution (UHPFRC: Construction Material, dimensioning and Application)[S]. Swiss, 2016.

[6] ASTM, 2015 Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Section 4, Volume 04.01[S]. USA, 2015.

[7] KCI. (2012). Design recommendations for ultra-high performance concrete K-UHPC. KCI-M-12-003[S]. Seoul: Korea Concrete Institute, 2012.

[8] 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.
GB/T 31387−2015, Chinese National Standard, Reactive Powder Concrete[S] (in Chinese). Beijing, China, 2015.

[9] ALSALMAN A, DANG C N, PRINZ G S, et al. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 153: 918–928.

[10] AHMAD S, HAKEEM I, AZAD A K. Effect of curing, fibre content and exposures on compressive strength and elasticity of UHPC[J]. Adv Cem Res, 2015, 27(4): 233–239.

[11] YOO D Y, LEE J H, YOON Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites[J]. Compos Struct, 2013, 106: 742–753.

[12] LE Hoang A, FEHLING E, THAI D K, et al. Evaluation of axial strength in circular STCC columns using UHPC and UHPFRC[J]. J Constr Steel Res, 2019, 153: 533–549.

[13] BONNEAU O, POULIN C, DUGAT J, et al. Reactive powder concretes: from theory to practice[J]. Concr Int, 1996, 18(4): 47–49.

[14] SRITHARAN S, BRISTOW B, PERRY V. Characterizing an ultra–high performance material for bridge applications under extreme loads[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, FL, 2003.

[15] MA J, DEHN F, TUE N V, et al. Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates proceedings[C]//International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004: 205–212.

[16] KOLLMORGEN G A. Impact of age and size on the mechanical behavior of and ultra-high performance concrete[C]//MS Thesis in Civil Engineering, Michigan Technological University, Houghton, Michigan, 2004.

[17] HASSAN A M T, JONES S W, MAHMUD G H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Constr Build Mater, 2012, 37: 874–882.

[18] 鞠彦忠, 王德弘, 康孟新. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土力学性能的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013(2): 110–117.
JU Yanzhong, WANG Dehong, KANG Mengxin. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2013(2): 110–117.

[19] 徐魏魏, 刘中宪, 赵永娇, 等. 钢纤维超高性能混凝土单轴受压试验研究[J]. 工业建筑, 2016(12): 104–109.
XU Weiwei, LIU Zhongxian, ZHAO Yongjiao, et al. Ind Constr (in Chinese), 2016(12): 104–109.

[20] HANNAWI K, BIAN H, PRINCE-AGBODJAN W, et al. Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concretes[J]. Compos Part B: Engineering, 2016, 86: 214–220.

[21] ASHOUR S A, WAFA F F, KAMAL M I. Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on the flexural behavior of fibrous concrete beams[J]. Eng Struct, 2000, 22(9): 1145–1158.

[22] 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. 混凝土结构设计规范: GB50010-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
GB50010-2002. Chinese National Standard, Reactive Powder Concrete[S]. Beijing, China, 2002 (in Chinese).

[23] ACI 363R-10. Report on high-strength concrete[S]. ACI, USA, 2010.

[24] GRAYBEAL B. “Material Property Characterization of ultra-high Performance Concrete,” FHWA-HRT-06-103, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2006, 3: 35–36.

[25] AHLBORN T M, PEUSE E J, MISSON D L. Ultra-high performance concrete for Michigan bridges, material performance: phase I[R]. Michigan Dept of Transportation, 2008.

[26] SKAZLIĆ M, BJEGOVIĆ D, ŽELJANA Skazlić. Acoustic emission response and mechanical characterization of ultra-high performance concrete types[C]//International Symposium on the Utilization of High Strength/high-performance Concrete, 2005.

[27] ICHINOMIYA T, HISHIKI Y, OHNO T. Experimental study on mechanical properties of ultra-high-strength concrete with low-autogenous-shrinkage[C]//International Symposium on the Utilization of High Strength/high-performance Concrete, 2005.

[28] BONNEAU O, LACHEMI M, DALLAIRE D, et al. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes[J]. ACI Mater J, 1997, 94(4): 286–290.

[29] MAGUREANU C, SOSA I, NEGRUTIU C, et al. Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete[J]. ACI Mater J, 2012,109(2): 177–183.

[30] HABEL K, DENARIÉ E, BRÜHWILER E. Experimental investigation of composite ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete members[J]. ACI Struct J, 2007, 104(1): 93–101.

[31] AHMAD S, HAKEEM I, AZAD A K. Effect of curing, fibre content and exposures on compressive strength and elasticity of UHPC[J]. Adv Cem Res, 2015, 27(4): 233–239.

[32] MAGUREANU C, SOSA I, NEGRUTIU C, et al. Physical and mechanical properties of ultra-high strength fiber reinforced cementitious composites[C]//Proceedings of FraMCoS–7, 2010: 23–28.

[33] HAJAR Z, LECOINTRE D, SIMON A, et al. Design and construction of the world first ultra-high performance concrete road bridges[C]//Proceedings of the Int. Symp. on UHPC, Kassel, Germany, 2004: 39–48.

[34] HEGGER J, TUCHLINSKI D, KOMMER B. Bond anchorage behavior and shear capacity of ultra high performance concrete beams[C]//Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2004: 351–360.

[35] HOLSCHEMACHER K, WEIßE D, KLOTZ S. Bond of reinforcement in ultra high strength concrete[C]//Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel University Press Kassel, Germany, 2004: 375–388.

[36] STIEL T, KARIHALOO B, FEHLING E. Effect of casting direction on the mechanical properties of CARDIFRC[C]//Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004: 481–493.

[37] EMPELMANN M, TEUTSCH M, STEVEN G. Improvement of the post fracture behaviour of UHPC by fibres[C]//Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2008: 177–184.

[38] SCHEYDT J, MULLER H, HEROLD G. Long term behaviour of ultra–high performance concrete under the attack of chlorides and aggressive waters[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 2008: 231–238.

[39] TUE N, KÜCHLER M. Load and deformation behavior of confined ultra high performance concrete dowels[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 553–560.

[40] SCHMIDT C, REIDDL S. Strengthening and rehabilitation of pavements applying thin layers of reinforced ultra-high performance concrete (UHPC-White topping)[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 655–662.

[41] MATSUBARA N, SAKAI G, ISHII S, et al. Application of a New Type of ultra-high strength fiber reinforced concrete to a prestressed concrete bridge[C]//Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 787–794.

[42] ALMANSOUR H, LOUNIS Z. Structural performance of precast prestressed bridge girders built with ultra high performance concrete[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 823–830.

[43] BRUHWILER E, DENARIĚ. Rehabilitation of concrete structures using ultra-high performance fiber reinforced concrete[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008: 895–902.

[44] KOLLMORGEN G A. Impact of age and size on the mechanical behavior of an ultra high performance concrete[R]. 2004.

[45] COELLO E D R. Prestress Losses and development length in pretensioned ultra high performance concrete beams[M]. ProQuest, 2007.

[46] SOBUZ H R, VISINTIN P, ALI M S M, et al. Manufacturing ultra–high performance concrete utilising conventional materials and production methods[J]. Constr Build Mater, 2016, 111: 251–261.

[47] 安明喆, 宋子辉, 李宇, 等. 不同钢纤维含量 RPC 材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 34–38.
AN Mingzhe, SONG Zihui, LI Yu, et al. China Railway Sci (in Chinese), 2009, 30(5): 34–38.

[48] 黄政宇, 谭彬. 活性粉末钢纤维混凝土受压应力–应变全曲线的研究. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 415–420.
HUANG Zhengyu, TAN Bin. J China Three Gorges Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2007, 29(5): 415–420.

[49] GRAYBEAL A B. Compression response of a rapid-strengthening ultra-high performance concrete formulation[J]. Federal Highway Admin, 2012, 49(9): 9–12.

[50] PRABHA S, LAVANYA. Stress strain of RPC under uniaxial compression[J]. Inter J Eng Sci Technol, 2010, 2(11): 6408–6416.

[51] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 125–134.
ZHENG Wenzhong, LI Li, LU Shanshan. J Build Struct (in Chinese), 2011, 32(6): 125–134.

[52] GEBUHR G, PISE M, SARHIL M, et al. Analysis and evaluation of the pull-out behavior of hooked steel fibers embedded in high and ultra-high performance concrete for calibration of numerical models[J]. Struct Concr, 2019, 10(1):1–11.

[53] LIM W Y, HONG S G. Compressive behavior of hybrid steel fiber reinforced ultra-high performance concrete[J]. J Korea Concr Inst, 2016, 28(2): 213–221.

[54] GARAS V Y, KURTIS K E, KAHN L F. Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(4): 493–502.

[55] 杜任远. RPC 梁拱极限承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
DU Renyuan. Reasearch on ultimate load-carrying capacities of reactive powder concrete (RPC) box girder and arch[D]. Fuzhou University, 2013.

[56] GRAYBEAL B. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. ACI Mater J, 2007, 104(2): 146–152.