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.0454-5648.20200286

超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测

欧阳雪[1]，史才军[1]，史金华[1]，单　波[1]，吴泽媚[1]，黄　勇[1]，邢　颖[2]

(1. 湖南大学土木工程学院，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. 太原理工大学土木工程学院，太原 030024)

摘　要：研究了不同水胶比和玄武岩骨料掺量对超高性能混凝土(UHPC)受压力学性能的影响。结果表明：抗压强度随水胶比的增加表现出先增大后减小的趋势，而弹性模量呈持续减小趋势，当水胶比为 0.16 时，UHPC 的抗压强度较佳；掺入粗骨料对 UHPC 的抗压强度和弹性模量均有较大影响，随着骨料掺量的增加，抗压强度呈现先增加后减小的趋势，弹性模量则持续增大。建立了考虑粗骨料参数的 UHPC 弹性模量半经验计算公式，并采用已有文献数据对半经验公式进行验证。

关键词：超高性能混凝土；抗压强度；弹性模量；性能预测；玄武岩；水胶比
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0296–09
网络出版时间：2020–11–26



Compressive Mechanical Properties and Prediction for Elastic Modulus of Ultra-high Performance Concrete

OUYANG Xue[1], *SHI Caijun*[1], *SHI Jinhua*[1], *SHAN Bo*[1], *WU Zemei*[1], *HUANG Yong*[1], *XING Ying*[2]
(1. Key Laboratory for Green and Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The effects of water-to-binder ratio and basalt coarse aggregate on the compressive behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) were investigated. The results show that the compressive strength of UHPC firstly increases and then decreases, while the elastic modulus decreases with the increase of water-to-binder ratio, and the optimum compressive strength is obtained at a water-binder ratio of 0.16. The compressive strength firstly increases and then decreases, while the elastic modulus increases with the increase of coarse aggregate. In addition, a semi-empirical equation considering the parameters of coarse aggregate was also proposed for the prediction of elastic modulus of UHPC, which was validated using the existing literature data.

Keywords: ultra-high performance concrete; compressive strength; elastic modulus; performance prediction; basalt coarse aggregate; water-to-binder ratio

超高性能混凝土(UHPC)具有优异的力学性能，其抗压强度通常在 120 MPa 以上[1]，其弹性模量在 40~60 GPa 之间，远高于普通混凝土，在大型复杂结构中得到广泛应用[2–3]。弹性模量是混凝土的基本力学指标之一，对混凝土的受力变形具有重要影响。一般而言，混凝土构件的正常使用极限状态(SLS)采用变形控制，提高混凝土的弹性模量，可以在一定程度上提高混凝土结构的整体刚度，从而减小结构在荷载作用下的变形。如果混凝土的弹性模量过低，构件可能会由于变形过大而无法正常使用。相比于普通混凝土，UHPC 弹性模量提高幅度远低于其抗压强度的提高幅度，很可能导致 UHPC 构件的

收稿日期：2020–04–19。　修订日期：2020–06–02。
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC0705400)；国家自然科学基金青年科学基金项目(51708384)。
第一作者：欧阳雪(1994—)，女，博士研究生。
通信作者：史才军(1963—)，男，博士，教授；
单　波(1976—)，男，博士，副教授。

Received date: 2020–04–19.　**Revised date:** 2020–06–02.
First author: OUYANG Xue (1994–), female, Doctoral candidate.
E-mail: ouyangxue@hnu.edu.cn
Correspondent authors: SHI Caijun (1963–), male, Ph.D., Professor.
SHAN Bo (1976–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: cshi@hnu.edu.cn;
supershanb@hnu.edu.cn

截面尺寸由变形控制，其抗压强度得不到充分发挥。因此，有效提高 UHPC 的弹性模量，对于 UHPC 的工程应用具有极为重要的意义。

一般而言，UHPC 的弹性模量与材料组分密切相关[3]。Wille 等[4]研究发现：随着水胶比增大，UHPC 的流动性增加，但强度降低；当水胶比减小到一定程度，UHPC 基体黏度随着增大，导致气泡增多，强度反而会降低[5]。Li 等[6]的研究显示，掺入适量的粗骨料可以减少胶凝材料用量，并能改善 UHPC 的受压性能，尤其是可以提高其弹性模量[7–8]。此外，也有研究发现粗骨料的品种对于 UHPC 的受压性能存在影响。如 Piasta 等[9]发现，采用高强、高刚度的玄武岩对于提升 UHPC 的弹性模量效果显著。Wu 等[10]的研究则表明，选用花岗岩和玄武岩作为骨料，UHPC 的抗压强度和抗弯强度相对更高。基于水胶比是影响 UHPC 性能最大的因素，以及粗骨料具有高弹性模量的特性，因此可以认为水胶比和骨料是制备高弹性模量 UHPC 的重要因素。

已有的相关成果为 UHPC 弹性模量预测提供了依据，但目前的研究并不完善。如一些研究者提出了 UHPC 抗压强度与弹性模量之间的经验公式，并被相关规范所采纳[11–16]。但这些经验公式仅仅是对试验结果进行拟合所提出的，原则上不能推广到试验范围之外，具有明显的局限性。而另一方面，有研究者基于相关理论模型预测 UHPC 的弹性模量，其推导和计算复杂，并不适于工程应用[17–18]。因此，有必要提出准确、适用的 UHPC 弹性模量预测方法。

本工作聚焦于水胶比和粗骨料对 UHPC 受压力学性能的影响，构建轴心抗压强度与立方体抗压强度及静态弹性模量与动态弹性模量的相关关系。在对已有经验公式进行估计的基础上，提出基于粗骨料参数的 UHPC 弹性模量半经验计算公式，为 UHPC 构件的变形预测提供依据。

1　实验

1.1　原材料

选择强度等级为 42.5 的硅酸盐水泥(P·I)作为试验用基准水泥，实测密度为 3.14 g/cm^3。所用硅灰的平均粒径为 0.1~0.2 μm，比表面积为 18 500 m^2/kg。选用最大粒径为 2.36 mm 的天然河砂作为细骨料，选用最大粒径为 10 mm 玄武岩碎石作为粗骨料。选用高效聚羧酸减水剂，减水率高于 30%。直线型微细钢纤维的直径和长度分别为 0.22 mm 和 13 mm 而长端钩型纤维的直径和长度为 0.3 mm×26 mm。

表 1　UHPC 配合比

Table 1　Mixture proportions of UHPC

Sample No.	W/B ratio	Mix proportion/(kg·m^{-3})							
		Cement	Silica fume	Slag	SP	Water	Sand	Steel fiber	Aggregates
B4	0.14	712	219	164	5.5	153	1095	157	0
B6	0.16	705	217	163	5.4	174	1085	157	0
B8	0.18	699	215	161	5.4	193	1075	157	0
C0	0.16	865	266	200	6.7	213	799	157	0
C400	0.16	718	221	166	5.5	177	662	157	400
C600	0.16	644	198	149	5.0	158	594	157	600
C800	0.16	570	175	132	4.4	140	526	157	800
C1000	0.16	496	153	114	3.8	122	458	157	1 000
C1200	0.16	422	130	97	3.2	104	390	157	1 200

Notes: The masses of cement, silica fume and slag are calculated as the ratio of the total mass of binder materials. The content of water reducer is 0.5% of the total mass of binder materials. W/B ratio is the water-to-binder ratio. The set of B includes 1% volume of short straight fiber and 1% volume of long hooked fiber while that of C has 2% volume of short straight fiber.

1.2　制备

UHPC 设计配合比如表 1 所示，其中编号 B、C 分别代表水胶比和粗骨料。UHPC 的搅拌制度如下：先将胶凝材料、粉状减水剂和砂加入搅拌机中低速干拌 3 min，然后加入水继续搅拌约 12 min；接下来均匀缓慢加入钢纤维并持续搅拌 10 min，直至达到均匀分布。对于含玄武岩骨料的配合比，先将干粉料、砂和玄武岩搅拌约 5 min，加水搅拌 15 min 左右至流化。然后缓慢加入钢纤维搅拌 10 min 至分散均匀后停止搅拌。试件成型后放入(20±2) ℃的环境下养护 24 h 后拆模，随后采用 80 ℃蒸汽养护 72 h，待试件在室温下冷却 12 h 后，再进行试验。

1.3　性能测试

UHPC 的抗压强度根据国家标准《活性粉末混

凝土》[19]和《混凝土物理力学性能试验方法标准》[20]进行测试，使用 3 000 kN 压力试验机进行加载。试验时，试验机的加载速率约为 1.2 MPa/s。静态弹性模量测试按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》[20]进行，加载速率为 1.2 MPa/s。动态弹性模量测试按照《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》[21]进行，采用 ZBL U520 非金属超声波检测仪进行测试。动态弹性模量计算公式如式(1)所示。

$$E_{\mathrm{d}}=\frac{V_{\mathrm{p}}^{2}(1+\upsilon)(1-2\upsilon)\rho}{1-\upsilon} \tag{1}$$

式中：E_{d} 为动态弹性模量；V_{p} 为超声脉冲法对测声速；ρ 为表观密度；υ 为 Poisson 比。根据相关文献研究，UHPC 的 Poisson 比在 0.18~0.23 范围内变化[22–23]，考虑粗骨料的影响，取 $\upsilon=0.2$。

2 结果与讨论

2.1 水胶比和粗骨料掺量对抗压强度的影响

2.1.1 水胶比 B 组试件的抗压强度如图 1 所示。由图 1 可以看出，在水胶比为 0.16 时，立方体抗压强度最高，达到了 170 MPa，而水胶比为 0.14 和 0.18 时，立方体抗压强度均有降低，其中，B8 试件的强度最低，约为 144.83 MPa。该变化规律与 Ahmad 等[15]的研究结果基本一致。一般而言，低水胶比 UHPC 的微观结构相对致密，水化产物水化硅酸钙凝胶较多，抗压强度较高；而高水胶比 UHPC 的微观结构相对疏松多孔，抗压强度相对较低[24]。但在水胶比过低的情况下，UHPC 流动性有所减小、黏度随着增大，导致气泡增多[4, 25]。因而水胶比为 0.16 试件的抗压强度高于水胶比为 0.14 试件强度。轴心抗压强度的变化趋势与立方体抗压强度规律相同，水胶比为 0.16 时达到最大值，当水胶比为 0.14 和 0.18 时，轴心抗压强度分别降低了 6.4%和 13.6%。分析表明，立方体抗压强度与轴心抗压强度随水胶比变化的幅度很接近，这表明轴心抗压强度与立方体抗压强度存在一定的相关性。

2.1.2 粗骨料掺量 图 2 为采用 C 组试验研究粗骨料掺量对 UHPC 抗压强度的影响。由图 2 可以看出，UHPC 的立方体抗压强度随粗骨料掺量的增加，呈先增加后降低的趋势。C0 组未掺粗骨料，其立方体抗压强度为 160.4 MPa，当掺量由 400 kg/m^3 增加至 1 200 kg/m^3 时，立方体抗压强度增长的幅度依次为 4.6%、8.7%、16.9%、11.2%、6.1%。可以发现，当粗骨料掺量为 800 kg/m^3 时，UHPC 立方体抗压强度达到最大值，为 187.6 MPa，而当掺量超过 800 kg/m^3 时，UHPC 抗压强度出现降低。

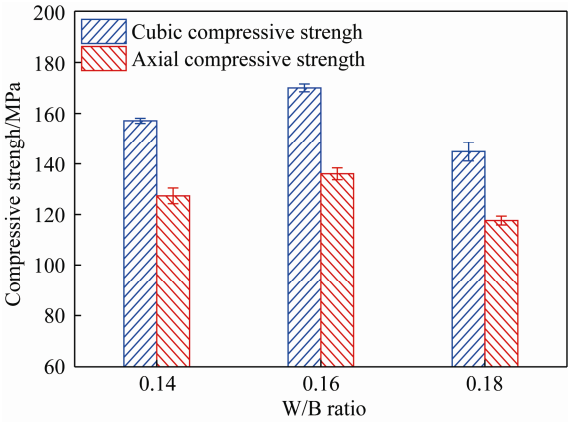


图 1 不同水胶比 UHPC 的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of UHPC with different W/B

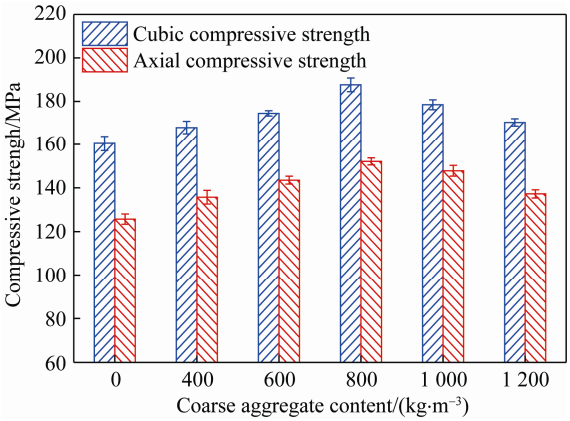


图 2 不同粗骨料掺量 UHPC 的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of UHPC with different coarse aggregate contents

粗骨料掺量对轴心抗压强度的影响，与立方体抗压强度基本一致，呈先增加后降低的特征。未掺粗骨料 UHPC 轴心抗压强度为 125.7 MPa，当掺量为 800 kg/m^3 时，UHPC 轴心抗压强度达到最大值 152.1 MPa。总的来看，在试验范围内，加入高强的玄武岩粗骨料，对 UHPC 抗压强度具有一定程度上的提高作用。但掺量过高后，UHPC 中缺乏足够的浆体包裹粗骨料，使得拌合物的流动性降低，导致硬化后的 UHPC 微观结构疏松多孔而强度降低[26]。此外，过多的粗骨料会阻碍钢纤维的均匀分布，使纤维团聚，大大降低了 UHPC 整体均匀性，施加荷载时易产生应力集中现象，对抗压强度有不利影响[9, 27]。

2.2 水胶比和粗骨料掺量对弹性模量的影响

2.2.1 水胶比 图 3为 B 组试件的弹性模量。首

先，可以看到 UHPC 弹性模量随着水胶比的增加而降低。水胶比为 0.14 时，UHPC 静态弹性模量为 53.6 GPa。随着水胶比的增大，静态弹性模量依次降低了 5.9%、11.4%。水胶比对动态弹性模量具有基本相同的影响规律。水胶比为 0.14~0.18 时，动弹性模量分别为 56.9、53.4、52.9 GPa。Ahmad 等[15]研究结果也显示 UHPC 弹性模量随水胶比的增加而降低。同时测试动态弹性模量的声波波速与 UHPC 的密度、孔隙直接相关。当水胶比较高时，内部微孔率较大[28]，使得 UHPC 表观密度变小，因而动态弹性模量降低。

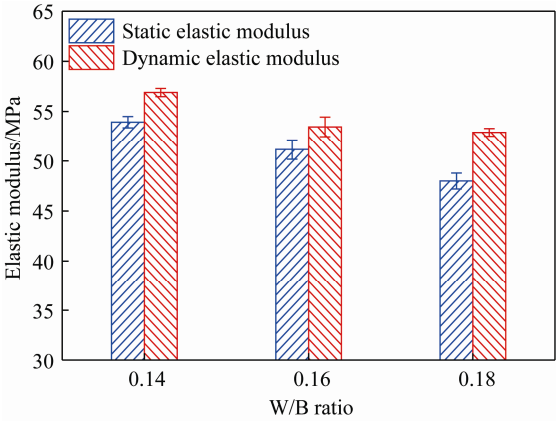


图 3　不同水胶比 UHPC 的弹性模量

Fig. 3　Elastic modulus of UHPC with different W/B

2.2.2　粗骨料掺量　　图 4 为 C 组试件的弹性模量。可以发现，UHPC 弹性模量均随着粗骨料掺量的增加而增大。未掺粗骨料 UHPC 的静态和动态弹性模量分别为 47.2 GPa 和 49.1 GPa。随着粗骨料掺量的增加，静态弹性模量增长的幅度依次为 7%、9%、13%、19%、22%。动态弹性模量增长的幅度与静态弹性模量大致相同，依次为 8%、10%、13%、21%、25%。当粗骨料掺量为 1 200 kg/m^3 时，UHPC 静态和动态弹性模量分别达到最大值，为 57.7 GPa 和 61.2 GPa。由此可知，粗骨料掺量的增加对 UHPC 弹性模量有重要影响。这是因为高弹性模量的玄武岩碎石在硬化基体中形成刚性骨架，可以有效减小 UHPC 的压缩变形，从而表现出更高的弹性模量[29]。

基于对试验数据的线性拟合，分别建立玄武岩粗骨料掺量和静、动态弹性模量的关系，如式(2)和式(3)所示。图 5 表明，UHPC 弹性模量与玄武岩粗骨料的掺量存在线性相关性。因此，在一定范围内增加粗骨料掺量是提高 UHPC 弹性模量的有效措施。

$$E = 0.008\,46M_{ca} + 47.146 \tag{2}$$

$$E_d = 0.009\,94M_{ca} + 48.698 \tag{3}$$

式中：E 为 UHPC 静态受压弹性模量(GPa)；E_d 为 UHPC 动态弹性模量(GPa)；M_{ca} 为玄武岩粗骨料掺量(kg/m^3)。

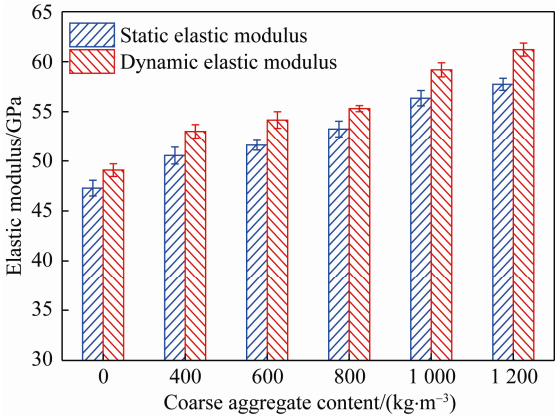
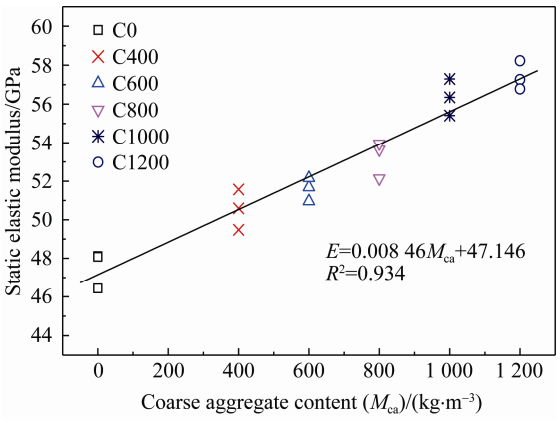
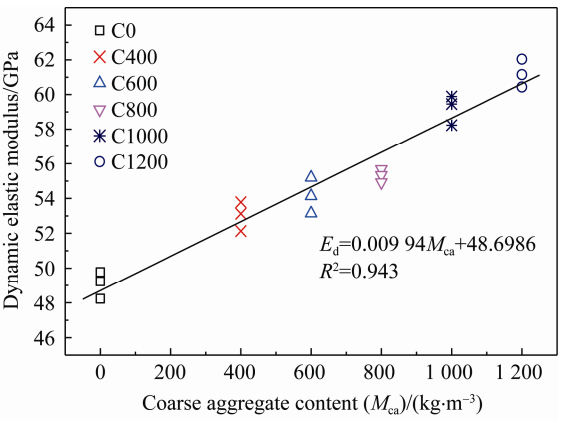


图 4　粗骨料掺量对 UHPC 动、静态弹性模量的影响

Fig. 4　Elastic modulus of UHPC with different contents of coarse aggregate



(a)



(b)

图 5　粗骨料掺量与(a)静态弹性模量和(b)动态弹性模量的关系

Fig. 5　Relationship between coarse aggregate content and (a) static elastic modulus and (b) dynamic elastic modulus

2.3 立方体抗压强度和轴心抗压强度的关系

从 B 组和 C 组的抗压强度可以看出，随着水胶比和粗骨料掺量的增加均表现出 UHPC 抗压强度先增加后降低的趋势。而轴心抗压强度略小于立方体抗压强度，这是由于混凝土的抗压强度受试件的尺寸和高宽比的影响较大。在不同尺寸的试件中，试件表面和加载面之间的摩擦不同，裂缝扩展和局部破坏也不同[30]。采用线性回归法，对 UHPC 立方体抗压强度和轴心抗压强度的关系进行拟合，如式(4)所示。由图 6 可知，两者呈现良好的线性相关性，UHPC 轴心抗压强度约为立方体抗压强度的 0.81 倍。

$$f_c = 0.809\,6 f_{cu} \tag{4}$$

式中：f_{cu} 为立方体抗压强度(MPa)；f_c 为轴心抗压强度(MPa)。

方志等[31]得出 100 mm×100 mm×400 mm RPC 轴心抗压强度和边长 100 mm 立方体抗压强度的关系系数为 0.89。吕雪源等[32]得出 100 mm×100 mm×300 mm RPC 轴心抗压强度与边长 70.7 mm 立方体抗压强度之间的转换系数为 0.845。王秋维等[23]得出 100 mm×100 mm×300 mm RPC 的轴心抗压强度约为边长 100 mm 立方体抗压强度的 0.83 倍。结合本试验结果可以发现，普通混凝土轴心抗压强度和立方体抗压强度的转换系数约为 0.7~0.8[33]，要小于 UHPC 的转换系数。

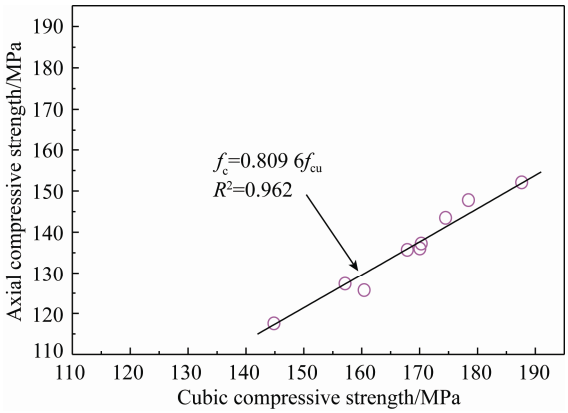


图 6 UHPC 立方体抗压强度和轴心抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between cubic and axial compressive strengths of UHPC

2.4 静态和动态弹性模量的关系

由 2.2 节可知，采用超声脉冲法测定的 UHPC 动态弹性模量较静态弹性模量高 6%左右。由于动态弹性模量是在低应力条件下测得，静态弹性模量则在较高应力下测定，且加载速度不一样[22]。其次，UHPC 的非匀质性对不同测试方法的影响各异。试件中微小裂缝和孔隙会影响静态弹性模量，但超声波波长远大于这些空隙，使得传播波速基本不受影响，因此动态弹性模量高于静态弹性模量。采用线性回归法，基于 B 组和 C 组弹性模量，建立了 UHPC 静、动态弹性模量相关关系。由图 7可知，动、静态弹性模量呈良好的线性相关性。静、动态弹性模量的转化系数约为 0.95，拟合相关系数接近于 0.9，如式(5)所示。已有研究表明未掺粗骨料 UHPC 静态弹性模量约为动态弹性模量的 0.90 倍[22]，小于本试验含粗骨料 UHPC 动、静态弹性模量转换系数，这可能是由于掺入粗骨料会对静态 E、动态弹性模量 E_d 间的相互关系产生影响。

$$E = 0.948\,4 E_d \tag{5}$$

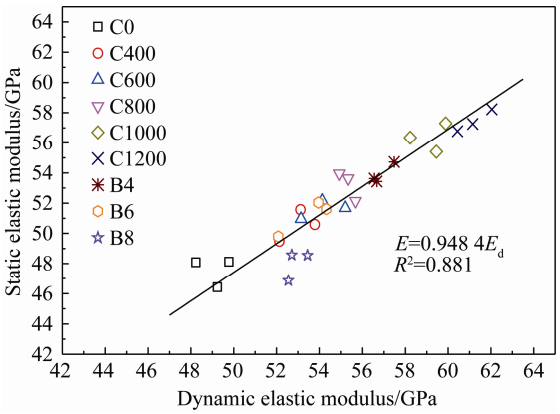


图 7 UHPC 静态和动态弹性模量关系

Fig. 7 Relationship between the static E and dynamic elastic modulus E_d of UHPC

3 弹性模量预测

3.1 基于抗压强度的经验公式

抗压强度作为混凝土最基本的力学性能，常将静态弹性模量与该指标联系起来，从而得到弹性模量间接计算公式。针对于 UHPC，已有大量规范[12]和研究[11, 13–16]对弹性模量和抗压强度的相关关系进行研究，并提出了相应的经验公式，其表达式形式大多采用幂函数，且指数在 0.3~0.5 范围之间，具体如表 2 所示。

基于本试验数据，采用相关经验公式对 UHPC 的弹性模量进行预测，结果如图 8所示。

为便于讨论，将表 2 中经验公式按顺序分别命名为式(1)~式(7)，表 3 也给出了计算结果和试验结果的相对误差值，具体情况如下：1) 对于未掺粗骨料的 C0 组，式(2)和式(7)的计算值与 C0 组试验值较为接近，误差小于 5%。而式(1)、式(3)和式(4)的误

表 2　弹性模量经验表达公式

Table 2　Expressions of compressive strength with respect to compressive strength

No.	Equation	Notes	Ref.
1	$E_c = 9.5\sqrt[3]{f_{cu}}$	Heat-cured UHPC, $f_{cu}\geqslant 140$ MPa	[12]
2	$E_c = 19\sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{10}}$ $E_c = 21.902\sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{10}}$	UHPC without coarse aggregates UHPC with basalt coarse aggregates	[13]
3	$E_c = \frac{1}{0.017\ 2 + 0.836\ 4/f_{cu}}$	60 MPa$\leqslant f_{cu}\leqslant$220 MPa	[34]
4	$E_c = 8.01 f_{cu}^{0.36}$	31 MPa$\leqslant f_{cu}\leqslant$235 MPa, 25 GPa$\leqslant E_c\leqslant$68.3 GPa	[16]
5	$E_c = 4.2\sqrt{f_{cu}}$	UHPC with crushed aggregate, f_{cu}=177 MPa	[11]
6	$E_c = 4.36\sqrt{f_{cu}}$	$f_{cu}\approx$130 MPa	[15]
7	$E_c = 3.84\sqrt{f_{cu}}$	126$\leqslant f_{cu}\leqslant$193 MPa	[14]

Notes: f_{cu} is the compressive strengths of UHPC (MPa); E_c is the static elastic modulus of UHPC (GPa).

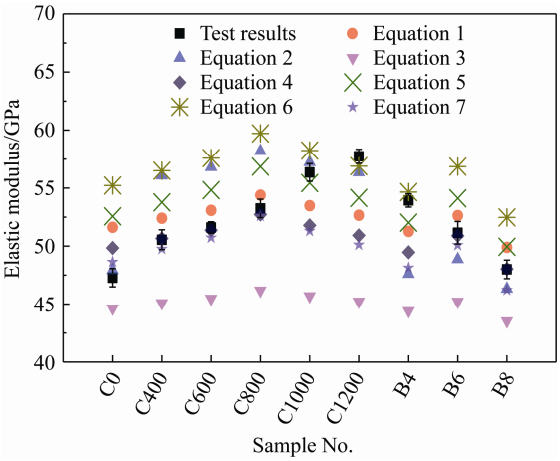


图 8　弹性模量的实测值和不同公式计算结果的对比

Fig. 8　Comparison of experimental results and expression evaluation results of elastic modulus

差在 10%以内。2) 对于 C400~C800 组，式(1)、式(4)、式(7)的估计误差较小，其中，式(4)的估计值与试验结果最为接近。3) 对于 C1000~C1200 组，基于掺玄武岩粗骨料 UHPC 提出的式(2)，其计算结果误差在 5%以内。此外，式(6)对 C1000 组的弹性模量也有较好的预测。但各公式对于 C1200 组的预测结果均小于试验结果。4) 考察水胶比变化组(B 组试件)，式(1)的计算结果与试验值较为接近。而式(2)、式(4)、式(7)在水胶比为 0.16 和 0.18 时计算误差较小，但在低水胶比时(水胶比为 0.14)，计算结果均偏低。

综上所述，对于粗骨料掺量不高的 UHPC (含无粗骨料 UHPC)，宜采用式(1)估算其弹性模量。而当粗骨料掺量超过 1 000 kg/m^3 后，宜采用式(2)估算 UHPC 的弹性模量。

3.2　基于粗骨料的半经验公式

为考虑粗骨料的弹性模量及掺量对 UHPC 弹性模量的影响，将 UHPC 视作粗骨料与基体的两相复合材料，弹性模量由两者叠加而成，见式(6)[35]。

$$E = E_{ca}V_{ca} + \lambda E_m V_m \tag{6}$$

式中：E、E_{ca} 和 E_m 分别为 UHPC、粗骨料和基体的

表 3　弹性模量的计算结果和试验结果的相对误差值

Table 3　Relative error values of expression evaluation results of elastic modulus　　ε/%

No.	Test results	Equation 1	Equation 2	Equation 3	Equation 4	Equation 5	Equation 6	Equation 7
C0	47.3	9.19	1.36	–5.63	5.41	12.53	16.81	2.88
C400	50.5	3.68	10.95	–10.81	0.22	7.66	11.76	–1.57
C600	51.6	2.88	10.09	–11.88	–0.46	7.52	11.61	–1.70
C800	53.2	2.14	9.30	–13.28	–0.98	8.05	12.16	–1.21
C1000	56.4	–5.09	1.57	–18.92	–8.11	–0.44	3.36	–8.97
C1200	57.7	–8.81	–2.42	–21.68	–11.83	–5.09	–1.47	–13.22
B4	53.9	–4.95	–11.76	–17.68	–8.29	–2.38	1.34	–10.75
B6	51.1	2.90	–4.48	–11.61	–0.50	7.08	11.16	–2.10
B8	48.0	3.95	–3.50	–9.31	0.09	5.32	9.33	–3.71

Notes: Measured errors less than 5% have been shown in bold; ε is error.

弹性模量(GPa)；V_{ca} 和 V_m 分别为粗骨料和基体的体积分数，基体体积分数可写为：V_m=1–V_{ca}；λ 为由粗骨料引起的基体弹性模量折减系数，可得式(7)。

$$E = E_{ca}V_{ca} + \lambda E_m\left(1 - V_{ca}\right) \tag{7}$$

研究表明，UHPC 流动性受粗骨料掺量的影响，与其质量和密度相关[10]。因此，折减系数应为粗骨料质量和密度的函数。假定折减系数可用式(8)表示。

$$\lambda = 1 - \beta\frac{M_{ca}}{\rho_{ca}} = 1 - \beta V_{ca} \tag{8}$$

式中：β 为影响系数；V_{ca} 为粗骨料的体积分数(%)；M_{ca}、ρ_{ca} 为粗骨料的单位质量(kg/m^3)和密度(kg/m^3)。

E_{ca} 可取为 98 GPa[36]；对含粗骨料组，以 C400~C1200 试验值作为 UHPC 弹性模量(E)；以 C0 试验值作为未掺入骨料的基体的弹性模量(E_m)，即此时折减系数为 1。玄武岩的密度为 2 800~3 300 kg/m^3。选用玄武岩骨料密度 2 930 kg/m^3 对试验数据进行回归分析[10]，可得 β 为 0.833。综上可得 UHPC 弹性模量与骨料掺量的相关关系表达式如式(9)所示，并根据式(9)结果将预测值与试验值对比，如图 9所示。由图 9 可知，预测值与试验值吻合较好，估算误差小于 2%。由式(9)和图 9可知，提高粗骨料的弹性模量和掺量可有效提高 UHPC 弹性模量，故选用高弹模粗骨料并适当提高其掺量是制备高弹模 UHPC 时的关键所在。而工程应用中，常以粗骨料的单位质量为掺量单位。为便于工程应用，可将式(9)改写为式(10)。

$$E = E_{ca}V_{ca} + (1 - 0.833V_{ca})E_m\left(1 - V_{ca}\right) \tag{9}$$

$$E = E_{ca}\frac{M_{ca}}{\rho_{ca}} + (1 - 0.833\frac{M_{ca}}{\rho_{ca}})E_m\left(1 - \frac{M_{ca}}{\rho_{ca}}\right);$$

$$(0 \leqslant M_{ca} \leqslant 1\ 200\ \ \mathrm{kg/m^3}) \tag{10}$$

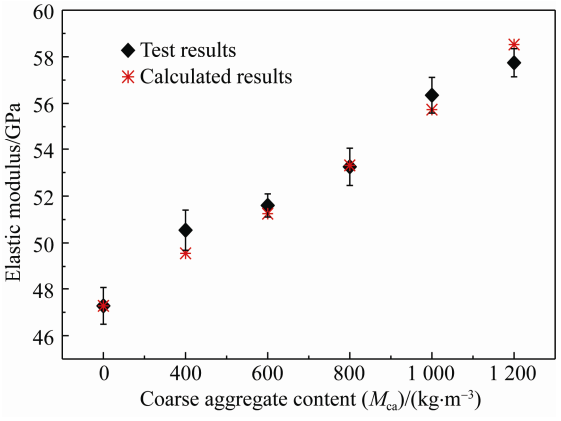


图 9 式(9)计算结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of Eq. (9) with measured results

由于式(10)是基于本试验值的半经验公式，其适用性还需其他研究者的试验数据进行验证。选取相关文献中，含有玄武岩骨料的 UHPC 抗压试验数据[7–8, 10]，对式(10)的可靠性进行评价，其计算结果与文献数据的对比结果如图 10 所示。可以看到，其相对误差均在 10%以内，表明式(10)对含玄武岩骨料的 UHPC 弹性模量有较好的估算精度。

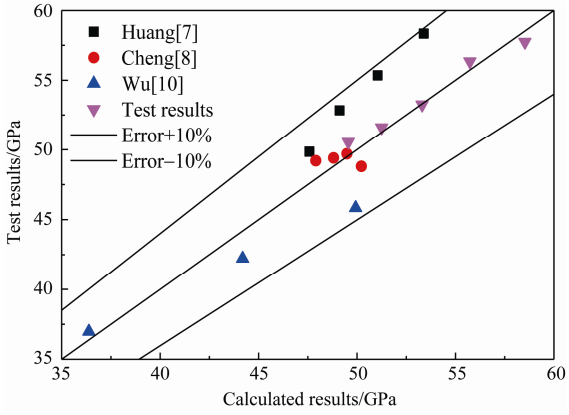


图 10 式(10)计算结果与文献数据对比

Fig. 10 Comparison of Eq. (10) with test results in literature

以上对弹性模量的两种预测方法的分析讨论结果表明：基于抗压强度的弹性模量经验计算公式，需相应的抗压强度作为输入参数，且大多数用立方体抗压强度进行计算，不同强度等级的混凝土需采用对应的不同的计算公式，掺入其它材料时需对公式进行修正。所提出的基于粗骨料参数的弹性模量半经验公式仅需基体的弹性模量代入进行计算，可以得出不同骨料含量的 UHPC 的弹性模量，预测结果也较为准确。

4 结论

1) 当水胶比为 0.14~0.18 时，UHPC 抗压强度随着水胶比的增加呈先增大后减小的趋势，而弹性模量随着水胶比的增加而持续降低。当粗骨料掺量为 0~1 200 kg/m^3 条件下，UHPC 的抗压强度随粗骨料掺量增加，呈先上升后下降的趋势，而弹性模量随粗骨料掺量增加而持续增大，在本试验条件下，静态和动态弹性模量最大值分别达到了 57.7 GPa 和 61.2 GPa。

2) 基于立方体抗压强度、轴心抗压强度和静态、动态弹性模量，建立的各力学性能相互关系表明，UHPC 的轴心抗压强度约为立方体抗压强度的 0.81 倍，静态弹性模量约为动态弹性模量的 0.95 倍。

3) 通过对已有 UHPC 弹性模量的经验公式对比分析，发现不同配合比需采用相应的计算公式进行预测。同时基于试验结果建立了考虑粗骨料参数的 UHPC 弹性模量的半经验公式，并采用现有文献中的数据进行验证，发现该公式仍具有较好的估算精度，应用范围得到进一步提高。

参考文献:

[1] GU C, YE G, SUN W. Ultra high performance concrete-properties, applications and perspectives[J]. Sci China-Technol Sci, 2015, 58(4): 587–599.

[2] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Constr Build Mater, 2015, 101(1): 741–751.

[3] WANG D, SHI C, WU Z, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Constr Build Mater, 2015, 96: 368–377.

[4] WILLE K, NAAMAN A E, PARRA-MONTESINOS G J. Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way[J]. ACI Mater J, 2011, 108(1): 46–54.

[5] WANG C, YANG C, LIU F, et al. Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials[J]. Cem Concr Compos, 2012, 34(4): 538–544.

[6] LI P P, YU Q L, BROUWERS H J H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Constr Build Mater, 2018, 170: 649–659.

[7] 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) (in Chinese), 2018, 45(3): 47–54.

[8] 程俊, 刘加平, 刘建忠, 等. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究及机理分析[J]. 材料导报, 2017, 31(12): 115–119, 131.
CHENG Jun, LIU Jiaping, LIU Jianzhong, et al. Mater Rep (in Chinese), 2017, 31(12): 115–119, 131.

[9] PIASTA W, GORA J, BUDZYNSKI W. Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes[J]. Constr Build Mater, 2017, 153: 728–739.

[10] WU F, XU L, CHI Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate[J]. Compos Struct, 2020, 236: 111810.

[11] SRITHARAN S, BRISTOW B, PERRY V. Characterizing an ultra-high performance material for bridge applications under extreme loads[C]// 3rd Internatinal Symposium on High Performance Concrete, PCI, Orlando, Florida, 2003.

[12] SETRA and AFGC. Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes-Interim Recommendations[S]. France, 2002.

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

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

[15] AHMAD S, ZUBAIR A, MASLEHUDDIN M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 99: 73–81.

[16] 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.

[17] GAO X, WEI Y, HUANG W. Effect of individual phases on multiscale modeling mechanical properties of hardened cement paste[J]. Constr Build Mater, 2017, 153: 25–35.

[18] DEMIR F. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete by artificial neural networks[J]. Constr Build Mater, 2008, 22(7): 1428–1435.

[19] 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. 中华人民共和国国家标准 GB/T 31387-2015 活性粉末混凝土[S]. 中国, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Chinese Standard-GB/T 31387-2015, Reactive powder concrete[S]. P.R. China, 2015.

[20] 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. 中华人民共和国国家标准 GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 中国, 2019.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Chinese Standard-GB/T 50081-2019. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S]. P.R. China, 2019.

[21] 中国工程建设标准化协会. 中国工程建设标准化协会标准(CECS 02: 2005) 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程[S]. 中国, 2005.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard of China Association for Engineering Construction Standardization (CECS 02: 2005) Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method[S]. P.R. China, 2005.

[22] 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): 128–134.
FANG Zhi, ZHOU Chuanbo. J China Railway Soc (in Chinese), 2018, 40(9): 128–134.

[23] 王秋维, 史庆轩, 陶毅, 等. 钢纤维活性粉末混凝土抗压力学性能及指标取值[J]. 建筑材料学报, 2019. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20191207.1421.002.html
WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, TAO Yi, et al. J Build Mater (in Chinese), 2019. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20191207.1421.002.html

[24] XU Y, LIU J, LIU J, et al. Experimental studies and modeling of creep of UHPC[J]. Constr Build Mater, 2018, 175: 643–652.

[25] 史才军, 肖江帆, 曹张, 等. 材料组成对 UHPC 性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6): 1005–1011.
SHI Caijun, XIAO Jiangfan, CAO Zhang, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2013, 32(6): 1005–1011.

[26] ZHANG J, AN X, YU Y, et al. Effects of coarse aggregate content on the paste rheological thresholds of fresh self-compacting concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 208: 564–576.

[27] VISHALAKSHI K P, REVATHI V, REDDY S S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete[J]. Eng Fract Mech, 2018, 194: 52–60.

[28] 万朝均, 尹亚柳, 王小茜, 等. 超高性能混凝土的制备[J]. 硅酸盐

通报, 2015, 34(12): 3676–3681.
WAN Chaojun, YIN Yaliu, WANG Xiaoqian, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(12): 3676–3681.

[29] XU L, WU F, CHI Y, et al. Effects of coarse aggregate and steel fibre contents on mechanical properties of high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 26: 97–110.

[30] BAŽANT Z P, PLANAS J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.

[31] 方志, 向宇, 刘传乐. 配置碳纤维预应力筋的钢纤维活性粉末混凝土无腹筋梁疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 101–107, 116.
FANG Zhi, XIANG Yu, LIU Chuanle. J Build Struct (in Chinese), 2013, 34(1): 101–107, 116.

[32] 吕雪源, 王英, 符程俊, 等. 活性粉末混凝土基本力学性能指标取值[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(10): 1–9.
LU Xueyuan, WANG Ying, FU Chengjun, et al. J Harbin Institute Technol (in Chinese), 2014, 46(10): 1–9.

[33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准 GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 中国, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Chinese Standard-GB50010-2010, Code for design of concrete structures[S]. P.R. China, 2010.

[34] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 369–376.
GUO Xiaoyu, KANG Jingfu, ZHU Jinsong. J Southeast Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2017, 47(2): 369–376.

[35] HASHIN Z. Analysis of composite materials—A Survey[J]. J Appl Mech, 1983, 50(3): 481–505.

[36] SORELLI L, CONSTANTINIDES G, ULM F J, et al. The nano-mechanical signature of ultra high performance concrete by statistical nanoindentation techniques[J]. Cem Concr Res, 2008, 38(12): 1447–1456.