

文章编号: 1001-4888(2024)03-0345-11

基于粗骨料和钢纤维分布的超高性能 混凝土力学性能研究及强度计算模型*

吕毅刚¹, 张靖航¹, 陈火文², 韩伟威³, 何贤良¹, 黄敦文¹, 彭晖¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 达濠市政建设有限公司, 广东汕头 515041;

3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 为探明粗骨料与钢纤维的相互作用对超高性能混凝土的综合影响, 研究了粗骨料体积掺量和钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响, 并通过 Image-Pro Plus 软件对试件切面进行处理, 计算粗骨料和钢纤维的均匀分布程度, 从而获得粗骨料和钢纤维分布情况对含粗骨料超高性能混凝土性能的影响规律。研究结果表明: 钢纤维掺量一定时, 粗骨料体积掺量对含粗骨料超高性能混凝土的抗压强度具有增强效果, 最高可提高 15.55%, 但会降低 24.34% 的抗折强度; 粗骨料掺量一定时, 在钢纤维与骨料的互锁作用下, 通过发挥耦合增强作用, 可以提高含粗骨料超高性能混凝土的抗压强度, 但过量的钢纤维容易结团, 会削弱钢纤维的桥接作用, 使抗折强度先增加后下降; 考虑粗骨料与钢纤维相互作用对力学性能影响的特点, 建立了含粗骨料掺量和钢纤维掺量双变量因素下的抗压强度、抗折强度计算模型, 计算模型准确度较好, 对工程应用具有一定的参考价值。

关键词: 超高性能混凝土; 粗骨料分布; 钢纤维分布; 力学性能; 计算模型

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-152

0 引言

超高性能混凝土(Ultra high performance concrete, 以下简称 UHPC)是基于均布超细致密体系原理^[1-3]开发的新型材料。通过提高材料匀质性和密实度, 掺入钢纤维提高韧性, 并改善孔隙结构, UHPC成为了一种具有创新性的水泥基复合材料。自问世以来, UHPC以其强度高、耐久性好、韧性强等优良特性, 受到国内外土木行业的高度重视。

UHPC具有广阔的应用前景, 目前已在桥隧工程、海洋工程、军事工程、道路和建筑等不同领域得到了广泛应用^[4-7]。但是 UHPC 胶凝材料用量大, 材料早期收缩大, 影响耐久性, 且对原材料要求严格, 制备工艺复杂, 生产成本低, 推广应用受到一定限制^[8-12]。为此, 部分学者提出在 UHPC 内掺入粗骨料替代部分胶凝材料, 从而制备含粗骨料超高性能混凝土^[13](Ultra high performance concrete with coarse aggregate, 以下简称 UHPC-CA)。

粗骨料的掺入使得 UHPC-CA 相较于 UHPC 材料具有成本下降的优势, 同时制作工艺和养护条件

* 收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878068); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30600, 2023JJ30020); 长沙市自然科学基金项目(kq2202208); 湖南省研究生科研创新资助项目(CX20220891); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性基金项目(17ZDXK07)

通信作者: 彭晖(1976-), 男, 博士, 教授。主要从事 FRP 增强混凝土结构的力学和耐久性能研究。Email: huipeng@csust.edu.cn

要求也相对较低,此外,它还具备更高的弹性模量和更出色的抗收缩开裂能力^[14-17]。如 WANG 等^[18]通过引入粗骨料,成功制备出了抗压强度超过 200MPa、弹性模量超过 54GPa 的 UHPC-CA,同时还成功降低了 60%收缩徐变和 30%水泥用量;SAHMARAN 等^[19]认为通过使用较粗的细骨料(最大粒径 2.38mm),可以获得性能更加优秀的 UHPC;黄维蓉等^[20]研究发现粗骨料粒径在 5~8mm,质量掺量不大于 400kg/m³时,UHPC-CA 表现出最优异的力学性能。但是,掺入粗骨料也带来了一些问题,首先粗骨料会形成粗骨料-基体界面过渡区,而这些薄弱的界面过渡区可能会影响材料微结构的组成,进而影响材料整体性能^[21-23];其次,粗骨料对钢纤维的分散性具有一定的负面影响^[24]。WU 等^[25]指出,粗骨料的掺入可能会阻碍钢纤维的均匀分布,进而降低钢纤维的均匀分散系数和取向系数,这一现象可能会对材料的力学性能和韧性产生影响;LI 等^[26]研究了钢纤维含量对 UHPC-CA 弯曲性能的影响,发现随着钢纤维含量的增加,UHPC-CA 的弯曲强度和能量吸收能力会降低。如果由于添加粗骨料而导致 UHPC-CA 的韧性大幅降低,将会违背发明 UHPC 的初衷,因此,有必要探索一种合理的配合比,以确保 UHPC-CA 在提高抗压强度的同时仍能保持一定的韧性。

此外,针对 UHPC-CA 强度计算模型,现有研究大多仅讨论粗骨料这一因素对 UHPC-CA 性能的影响,却忽视了 UHPC-CA 中钢纤维与粗骨料的协同作用对性能的影响,如沈楚琦等^[27]采用不同级配粒径的骨料制备 UHPC-CA,探究骨胶比对抗压强度的影响,并提出骨胶比与 UHPC 轴心抗压强度与立方体抗压强度比值的数学解析式;YU 等^[28]通过确定分布模量 q 值对 UHPC-CA 抗压强度的影响,然后根据不同的 q 值和粗骨料的粒径,提出了最佳粗骨料含量的经验计算方法。因此,有必要对粗骨料和钢纤维的含量进一步深入研究,考虑粗骨料与钢纤维的相互作用对 UHPC-CA 性能的影响的特点,建立 UHPC-CA 强度计算模型。

本文将通过研究粗骨料体积掺量和钢纤维体积掺量对 UHPC-CA 力学性能的影响,建立含钢纤维掺量和粗骨料掺量 2 个因素的 UHPC-CA 抗压强度、抗折强度计算模型,以期为 UHPC-CA 的应用研究提供理论基础。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

水泥:采用标号为 52.5 的普通硅酸盐水泥,其抗压和抗折强度分别为 32.8MPa 和 5.6MPa(3d)、59.8MPa 和 8.2MPa(28d)。掺合料:由硅灰、粉煤灰、矿渣等矿物掺合料复掺而得。钢纤维:选用江西大业金属纤维有限公司生产的平直型镀铜钢纤维(简称为 SF),尺寸为 13mm×0.2mm,抗拉强度为 2500MPa,弹性模量为 210GPa。细骨料:选用 3 种粒径(10 目~20 目、20 目~40 目、40 目~80 目)的精制石英砂。粗骨料:采用湖南地区的玄武岩碎石(简称为 CA),粒径为 5~8mm,压碎指标为 6.5%。高效减水剂:白色粉剂,减水率>30%。水:自来水。

1.2 配合比

本文试验以粗骨料体积掺量(0~40%)和钢纤维体积掺量(0~4%)为变量制备 UHPC-CA 试件,具体试验配合比设计见表 1。

1.3 试件制备

按表 1 配比称取原材料,先将水泥、掺合料、细骨料和粗骨料加入搅拌机内混合干拌 30s~60s;再将减水剂和水搅拌均匀、缓慢倒入搅拌机内,搅拌 3min~4min 以获得匀质浆体;最后将钢纤维均匀、少量多次撒入搅拌机内,搅拌 2min~3min 左右至钢纤维分散均匀。搅拌完成后对试件进行浇筑成型。试件成型后表面覆盖薄膜,在标准养护的条件下养护 48h 后拆模,然后进行 48h 蒸汽养护(90℃),待自然冷却后,移入标准养护室养护至 7d。

1.4 测试

UHPC-CA 力学性能试验依据规范 GB/T 31387-2015《活性粉末混凝土》^[29]进行测试。试件养护至测试龄期后进行测试,其中抗压强度试验试件尺寸为 100mm×100mm×100mm 的立方体试块,抗折强度试验试件尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试块,抗压强度试验加载速率为 1.2MPa/s~

1. 4MPa/s, 抗折强度试验加载速率为 0.08MPa/s~0.1MPa/s。

表 1 UHPC-CA 配合比设计

Tab. 1 Mix proportion design for UHPC-CA

编号	配合比/(kg/m ³)			水胶比	减水剂/%	粗骨料体积分数/%	钢纤维体积分数/%
	水泥	掺合料	石英砂				
1#	900	600	800	0.16	2	0	0.0
2#	900	600	800	0.16	2	0	2.0
3#	900	600	800	0.16	2	5	2.0
4#	900	600	800	0.16	2	10	2.0
5#	900	600	800	0.16	2	15	2.0
6#	900	600	800	0.16	2	20	2.0
7#	900	600	800	0.16	2	25	2.0
8#	900	600	800	0.16	2	30	2.0
9#	900	600	800	0.16	2	35	2.0
10#	900	600	800	0.16	2	40	2.0
11#	900	600	800	0.16	2	20	0.0
12#	900	600	800	0.16	2	20	0.5
13#	900	600	800	0.16	2	20	1.0
14#	900	600	800	0.16	2	20	1.5
15#	900	600	800	0.16	2	20	2.5
16#	900	600	800	0.16	2	20	3.0
17#	900	600	800	0.16	2	20	3.5
18#	900	600	800	0.16	2	20	4.0

注：粗骨料的体积百分数基于试件的体积而得。

采用立方体抗压试件采集 UHPC-CA 粗骨料和钢纤维分布的图像,将硬化后的试件沿浇筑方向在中心位置和两侧距中心位置 25mm 处进行切割,得到 3 个样品切面;将高清相机获得的图像导入 Image-Pro Plus 软件进行处理,考虑图像的光照条件和材料的特性,不同图像可能需要不同的二值化阈值,采用自动识别阈值的方法对图像进行处理,并对没有选中或误选的对象进行手动调整与优化;将获得的图像沿水平方向分成 10 等份,计算粗骨料和钢纤维的分布情况,样品切面及分布示意图如图 1 所示。

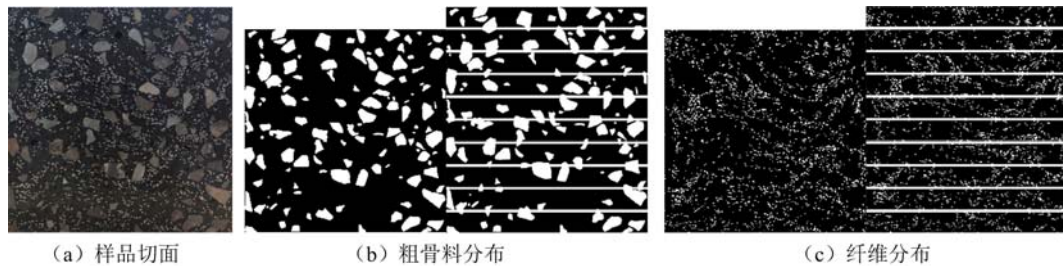


图 1 样品切面及分布示意图

Fig. 1 Sample cross-section and distribution schematic

(1) 粗骨料分布

粗骨料分布情况参照郑晓博等^[30]对混凝土中粗骨料分布情况的表征办法,依据各等份中粗骨料面

积与该等份总面积之比,通过式(1)计算出粗骨料的稳定性指数 SI 值:

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (p_i - \bar{p}_i)^2}{10}}}{\bar{p}_i} \quad (1)$$

式中: p_i 为第 i 等份粗骨料面积与该等份面积的比例; \bar{p}_i 为 p_i 的平均值。SI 值越大,表示粗骨料分布均匀程度越低。

(2) 钢纤维分布

对于钢纤维的分布评估,使用纤维分散系数 α 来评价其均匀分散性能, α 可通过截面内的纤维数量分布来计算,具体计算方法如式(2)^[31]:

$$\alpha = \exp\left(-\sqrt{\frac{\sum (x_i/\bar{x}_{avg} - 1)^2}{n}}\right) \quad (2)$$

式中: n 为试件切割面划分的图像张数; x_i 为切割面上第 i 张图像中的纤维数量; \bar{x}_{avg} 为采集的所有图像中纤维数量的平均值。 α 越接近于 1, 纤维均匀分散程度越高。

2 结果与讨论

2.1 骨料与钢纤维分布

图 2、图 3 分别为不同粗骨料体积掺量下 UHPC-CA 试件中心切面图及粗骨料、钢纤维分布计算结果。

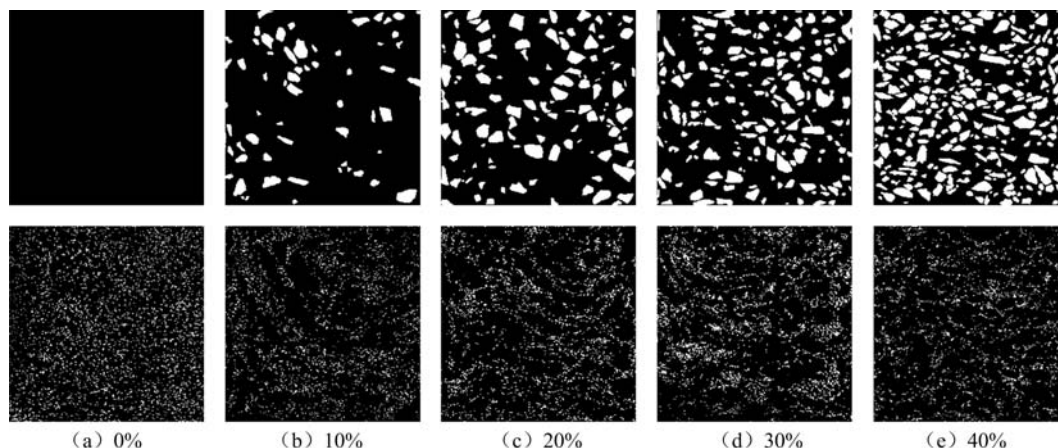


图 2 不同粗骨料体积掺量下 UHPC-CA 中心切面图(SF=2%)

Fig. 2 Center cross-section of UHPC-CA with different volume fractions of coarse aggregates (SF=2%)

结合图 2 和图 3 可以发现,SI 值随着粗骨料体积掺量的增加而下降,这是因为粗骨料在基体内部形成刚性骨架,在骨料的相互支撑下,它们的分布变得更加均匀,因此在试件各处的分布差异性减小。然而,过多的骨料并不能进一步提升其均匀分布程度。当骨料过多时,容易导致钢纤维结团严重,这会导致结团的钢纤维占据部分空间,从而阻碍粗骨料的均匀分布,因此 SI 值会增加。当粗骨料掺量在 30% 时,钢纤维结团较少,同时骨料数量较多,使得粗骨料分布更加均匀,SI 值最小。钢纤维均匀分布程度随着粗骨料体积掺量的增加而下降,这是因为粗骨料占据的体积越大,自由浆体体积越小,钢纤维更加容易与粗骨料发生碰撞,导致纤维缠结、集聚而不利于分散,最终导致纤维分散系数 α 下降。

图 4、图 5 分别为不同钢纤维体积掺量下 UHPC-CA 试件中心切面图及粗骨料、钢纤维分布计算结果。

从图 4 和图 5 的结果可以看出,在相同骨料体积掺量下,少量的钢纤维在基体内分布较为均匀。然而,继续增加钢纤维的掺量时,由于粗骨料的影响,钢纤维容易发生缠结和互锁,从而导致结团现象的发生,使得纤维均匀分散系数 α 下降。同时,由于钢纤维与骨料间的互锁作用以及自身结团现象的发生,

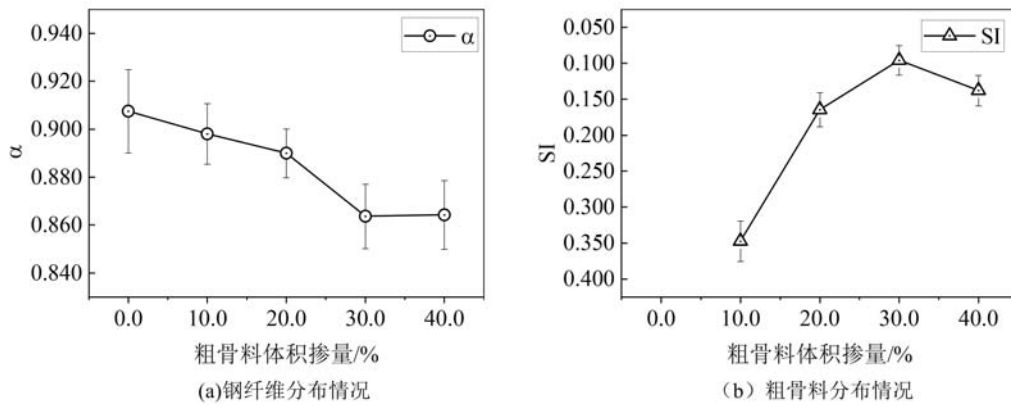


图 3 不同粗骨料体积掺量下 UHPC-CA 粗骨料及钢纤维分布计算结果

Fig. 3 Computational results of coarse aggregate and steel fiber distribution in UHPC-CA with different volume fractions of coarse aggregates

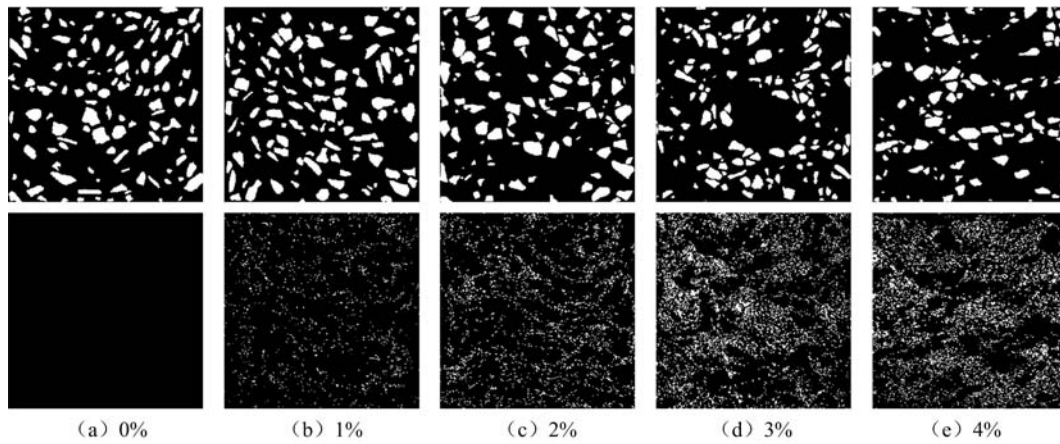


图 4 不同钢纤维体积掺量下 UHPC-CA 中心切面图(CA=20%)

Fig. 4 Center cross-section of UHPC-CA with different volume fractions of steel fibers (CA=20%)

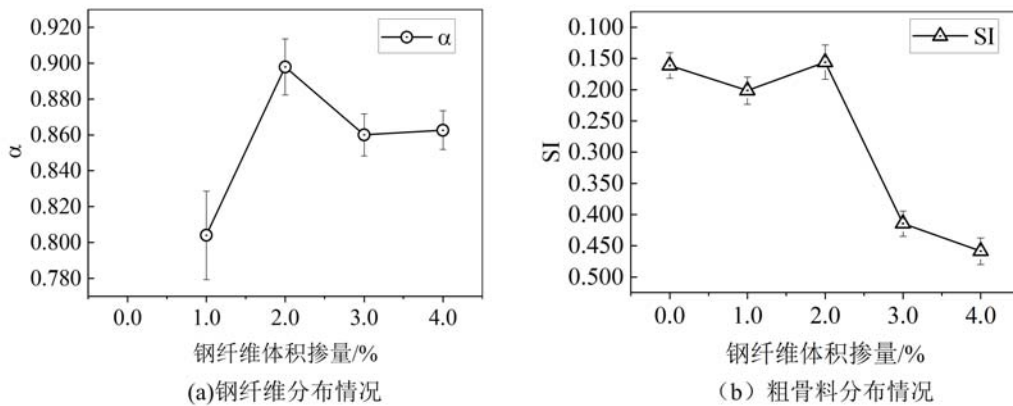


图 5 不同钢纤维体积掺量下 UHPC-CA 粗骨料及钢纤维分布计算结果

Fig. 5 Computational results of coarse aggregate and steel fiber distribution in UHPC-CA with different volume fractions of steel fibers

阻碍粗骨料的均匀分布,导致粗骨料稳定性指数 SI 随着纤维掺量的增加而增加。

2.2 抗压强度

图 6 展示了当钢纤维体积掺量为 2%时,不同粗骨料体积掺量下 UHPC-CA 的抗压强度。由图可以发现,粗骨料体积掺量对 UHPC-CA 抗压强度的影响比较复杂:当粗骨料用量较少时,相较于无粗骨料的情况,其抗压强度明显下降。这是因为粗骨料的少量引入,在基体内分布不均匀,其 SI 值较大,未

能形成较好的骨架效应,同时带来的基体-粗骨料界面过渡区使得基体性能下降,最终导致粗骨料体积掺量在 5% 和 10% 时,UHPC-CA 的抗压强度分别降低 10.74% 和 1.80%。

增加粗骨料的用量,其整体均匀分布程度随之提高,在基体内部形成较好的骨架效应,在骨料的相互支撑下,提高了混凝土的刚度,一定程度上补强了由基体-粗骨料界面过渡区劣化作用所引起的负面效应;加之钢纤维分散较为均匀,与粗骨料在基体内部形成互锁结构,使得基体的整体性更好,可以阻碍裂缝发展,最终使 UHPC-CA 的抗压强度提高,最高增加了 15.55%。

随着粗骨料用量的增加,其均匀分布程度无法进一步提升,甚至有所降低,骨架效应带来的增强效果有限,同时还会引入过多的基体-粗骨料界面过渡区;此外,过多的骨料,使纤维更容易发生碰撞摩擦至结团,纤维-骨料互锁效应下降,最终使得 UHPC-CA 抗压强度在高粗骨料体积掺量的情况下呈现出总体下降的趋势。

从图 7 可以看出,当粗骨料体积掺量为 20% 时,随着钢纤维体积掺量的增加,UHPC-CA 的抗压强度逐渐增加。这是因为钢纤维在基体内对产生的裂纹可以起到桥接作用,钢纤维随机分散到基体内,可以起到加筋补强的作用;此外,粗骨料掺量一定时,纤维用量的增加,使得纤维与骨料间的互锁作用更加突出,从而提高 UHPC-CA 的抗压强度。

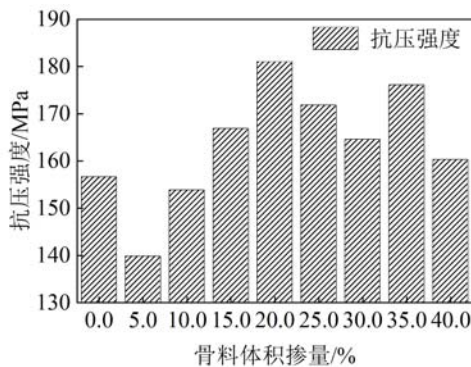


图 6 粗骨料体积掺量对 UHPC-CA 抗压强度的影响(SF=2%)

Fig. 6 Influence of coarse aggregate volume fraction on compressive strength of UHPC-CA (SF=2%)

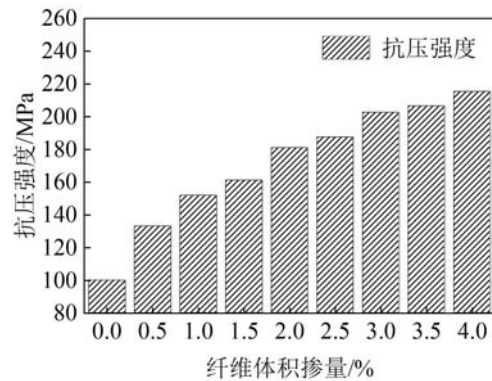


图 7 钢纤维体积掺量对 UHPC-CA 抗压强度的影响(CA=20%)

Fig. 7 Influence of steel fiber volume fraction on compressive strength of UHPC-CA (CA=20%)

2.3 抗折强度

图 8 为钢纤维体积掺量 2% 时,粗骨料体积掺量对 UHPC-CA 抗折强度的影响。由图可知,随着粗骨料体积掺量的增加,UHPC-CA 的抗折强度一直在下降。这是因为纤维的桥接作用对基体的抗折强度具有良好的增益性,但是钢纤维在与骨料碰撞摩擦的作用下,容易成团,或者分散不均匀,随着骨料用量增加,纤维分散系数 α 下降,导致纤维对裂缝的有效桥接增韧作用下降;此外,过多的基体-粗骨料界面过渡区,使得基体更容易开裂,最终导致 UHPC-CA 的抗折强度下降。在粗骨料掺量为 20% 时,UHPC-CA 抗折强度相较于不掺粗骨料时下降了 24.34%。

图 9 展示了当粗骨料体积掺量为 20% 时,不同钢纤维体积掺量下 UHPC-CA 的抗折强度。由图可以发现,随着钢纤维体积掺量的增加,UHPC-CA 的抗折强度先增加后降低,在掺量为 0% 时,抗折强度为 10.98MPa,随着掺量提高到 2.5% 时,其抗折强度达到最大值,为 29.69MPa,相较于不掺钢纤维时增长了 170.40%。这是因为钢纤维在基体内部对产生的裂纹可以起到桥接作用,对抗折强度具有增益性。当粗骨料掺量一定的情况下,适当的纤维用量,其分布较为均匀,能较好地发挥纤维的桥接作用,从而使 UHPC-CA 的抗折强度得到提高。随着钢纤维体积掺量的进一步增加,在与骨料的碰撞摩擦下,基体内开始出现纤维结团或分散不均匀,钢纤维的桥接作用开始减弱,混凝土抗折强度开始下降。

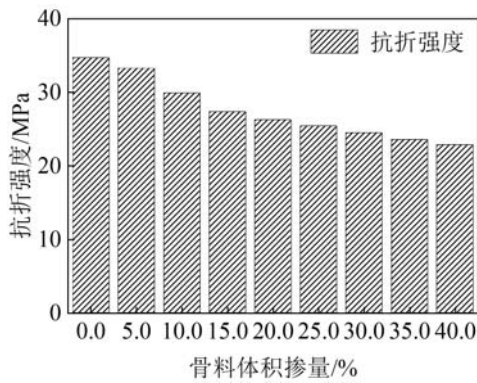


图 8 粗骨料体积掺量对 UHPC-CA 抗折强度的影响(SF=2%)

Fig. 8 Influence of coarse aggregate volume fraction on flexural strength of UHPC-CA (SF=2%)

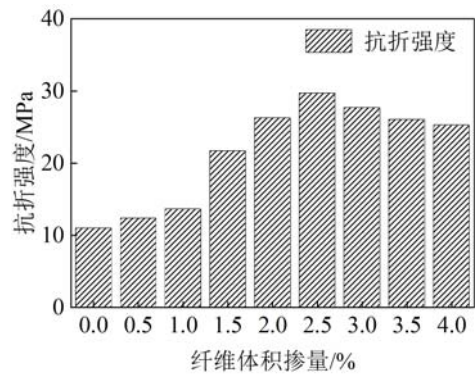


图 9 钢纤维体积掺量对 UHPC-CA 抗折强度的影响(CA=20%)

Fig. 9 Influence of steel fiber volume fraction on flexural strength of UHPC-CA (CA=20%)

3 强度计算模型

基于粗骨料及钢纤维分布情况,对试验结果进行数值回归,如图 10、图 11 所示。

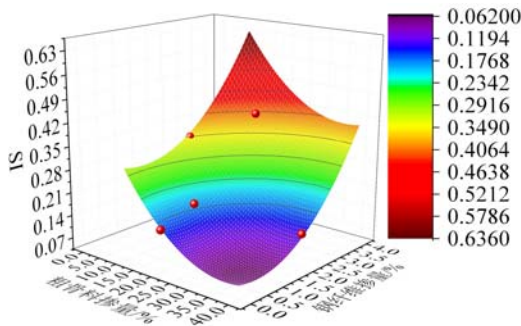


图 10 粗骨料及钢纤维掺量对粗骨料稳定性指数的影响
Fig. 10 Influence of coarse aggregate and steel fiber content on coarse aggregate stability index

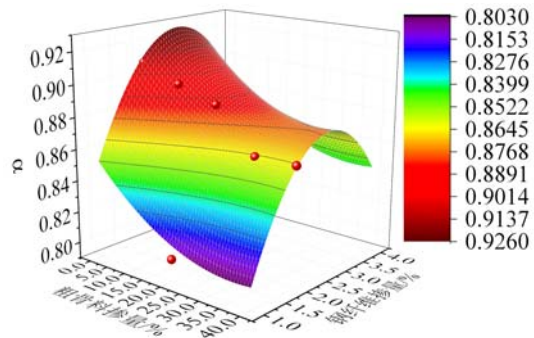


图 11 粗骨料及钢纤维掺量对纤维分散系数的影响
Fig. 11 Influence of coarse aggregate and steel fiber content on fiber dispersion coefficient

根据骨料和钢纤维相互影响的特点,得到粗骨料掺量和钢纤维掺量下的双变量计算公式:

$$\xi_{agg} = 0.525 - 2.481 x_{agg} - 3.115 x_{fibre} + 3.387 x_{agg}^2 + 279.879 x_{fibre}^2 \quad (3)$$

$$\xi_{fibre} = 0.747 - 0.273 x_{agg} + 12.753 x_{fibre} + 0.381 x_{agg}^2 - 227.413 x_{fibre}^2 \quad (4)$$

式中: ξ_{agg} 为粗骨料分布均匀程度,即 α 值; ξ_{fibre} 为钢纤维分布均匀程度,即 SI 值; x_{agg} 为粗骨料体积掺量百分数; x_{fibre} 为钢纤维体积掺量百分数。

UHPC-CA 的力学性能受粗骨料掺量、钢纤维掺量及其相互作用的影响,出于实际运用的目的,有必要了解 UHPC-C 的抗压强度和抗折强度在粗骨料掺量、钢纤维掺量影响下的变化。目前,针对 UHPC-CA 抗压强度和抗折强度的计算模型较少,且多考虑单一因素对强度的影响,同时钢纤维混凝土与 UHPC-CA 性能有所差异,钢纤维混凝土的计算模型不能完全适用于 UHPC-CA,因此,有必要开发一个新的计算模型来预测不同粗骨料掺量和钢纤维掺量下 UHPC-CA 的强度。

参考 JG/T 472-2015《钢纤维混凝土》^[32]中关于钢纤维混凝土强度的计算公式,本文提出考虑骨料掺量 x_{agg} 、纤维掺量 x_{fibre} 、骨料分布强度影响系数 η 和纤维分布强度影响系数 φ 对 UHPC-CA 抗压强度、抗折强度影响的计算模型。对于函数关系的选择,由图 6 可知,抗压强度随着粗骨料体积分量的增加,并不是一个线性的增长关系;相反,随着粗骨料体积分量的变化,抗压强度会有一个波动的过程,故 UHPC-CA 的抗压强度与骨料掺量之间存在 3 次函数的影响关系。由图 9 可以发现粗骨料掺量一定的

情况下,随着钢纤维掺量的增加,抗折强度先增后减少,故UHPC-CA的抗折强度与纤维掺量之间存在2次函数关系。

本文基于试验结果提出了用于计算UHPC-CA抗压强度和抗折强度的计算公式:

$$f_c = f_{c0}(1 - 16.646x_{agg}^3 + 7.666x_{agg}^2 - 0.259x_{agg})(1 + 8.29x_{fbre}^{0.607})(1 + \eta_c + \varphi_c) \quad (5)$$

$$f_f = f_{f0}(1 - 0.662x_{agg}^{0.675})(1 - 1755.220x_{fbre}^2 + 110.998x_{fbre})(1 + \eta_f + \varphi_f) \quad (6)$$

式中: f_c 为UHPC-CA的计算抗压强度; f_f 为UHPC-CA的计算抗折强度; f_{c0} 为不掺入钢纤维和粗骨料的混凝土抗压强度,此处 $f_{c0}=85.65\text{MPa}$; f_{f0} 为不掺入钢纤维和粗骨料的混凝土抗折强度,此处 $f_{f0}=11.95\text{MPa}$; η_c 、 η_f 为粗骨料分布对抗压强度、抗折强度的影响系数, $\eta_c = -0.1\xi_{agg}$ 、 $\eta_f = -0.05\xi_{agg}$,未添加粗骨料时取0; φ_c 、 φ_f 为钢纤维分布对抗压强度、抗折强度的影响系数, $\varphi_c = 0.05\xi_{fbre}$ 、 $\varphi_f = 0.16\xi_{fbre}$,未添加钢纤维时取0。

通过本文和参考文献^[20,33-36]中的抗压试验数据,将试验值与式(5)、式(6)计算得到的理论值进行对比,结果如图12和图13所示,抗压强度计算值与试验值比值的均值为1.009、均方差为0.068、变异系数为0.068,抗折强度计算值与试验值比值的均值为1.023、均方差为0.113、变异系数为0.113,可见计算模型效果良好。

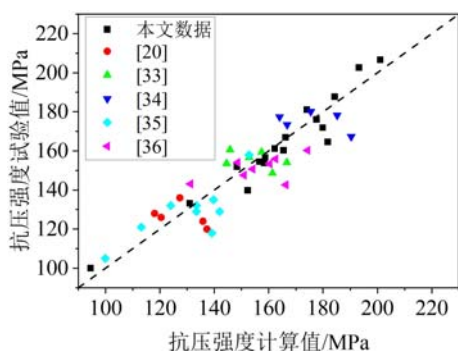


图12 UHPC-CA抗压强度计算值与试验值的对比
Fig. 12 Comparison between calculated compressive strength and experimental compressive strength of UHPC-CA

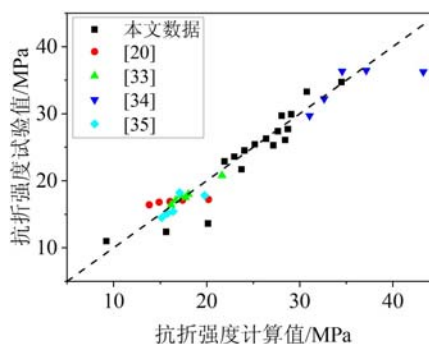


图13 UHPC-CA抗折强度计算值与试验值的对比
Fig. 13 Comparison between calculated flexural strength and experimental flexural strength of UHPC-CA

为了使式(5)、式(6)更适用于实际工程,在计算时,需要在式(5)、式(6)的基础上增加安全系数,参照GB 55008-2021《混凝土结构通用规范》^[37]可知:

$$f'_c = f_c/k_c \quad (7)$$

$$f'_f = f_f/k_f \quad (8)$$

式中: f'_c 为UHPC-CA的设计抗压强度; f'_f 为UHPC-CA的设计抗折强度; k_c 为UHPC-CA抗压强度的安全系数, $k_c=1.4$; k_f 为UHPC-CA抗折强度的安全系数, $k_f=1.6$ 。

4 结论

本文通过试验研究了不同粗骨料体积掺量和钢纤维体积掺量对UHPC-CA性能的影响,并将试验值与计算模型的结果进行对比,得出以下主要结论:

(1) 适量的粗骨料掺量对UHPC-CA的抗压强度有增强效应,当粗骨料体积掺量为20%时,其抗压强度最高,相较于不掺粗骨料时提高了15.55%。但是掺入粗骨料会降低钢纤维的分散性,对UHPC-CA的抗折强度有不利影响,并且随着掺量的增大,抗折强度一直下降。

(2) 骨料掺量一定时,随着钢纤维掺量的增大,UHPC-CA的抗压强度一直增加,纤维与骨料的互锁作用,能够在基体裂缝稳定扩展阶段发挥耦合增强作用,提高UHPC-CA的抗压强度。但是过量的钢纤维容易发生结团,导致纤维对裂缝的增韧作用下降,UHPC-CA的抗折强度随着纤维掺量的增加先增加后降低。

(3) 针对 UHPC-CA 纤维分布和骨料分布的特点,通过拟合建立了含钢纤维掺量和粗骨料掺量双重影响因素下的抗压、抗折强度计算模型。结合本文和参考文献数据,将试验值与计算模型得到的理论值进行对比,抗压强度计算值与试验值比值的均值为 1.009、均方差为 0.068、变异系数为 0.068,抗折强度计算值与试验值比值的均值为 1.023、均方差为 0.113、变异系数为 0.113,由此可见计算值与试验值符合程度良好。

参考文献:

- [1] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6):997-1009.
- [2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7):1501-1511.
- [3] 鞠彦忠,王德弘,单明. 活性粉末混凝土力学性能及冻融性能研究[J]. *实验力学*, 2012, 27(2):214-220 (JU Yanzhong, WANG Dehong, SHAN Ming. On the mechanical properties and freezing-thawing resistance of reactive powder concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(2):214-220 (in Chinese))
- [4] SHAO X D, YI D T, HUANG Z Y, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2013, 18(5):417-428.
- [5] XUE C C, YU M, XU H M, et al. Experimental study on thermal performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates at high temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314:125585.
- [6] LU K W, XU Q Z, DU L P, et al. Fatigue performance of prefabricated coarse aggregate ultrahigh-performance concrete deck subjected to negative bending moment[J]. *Engineering Structures*, 2023, 274:115098.
- [7] LIU Z, ALSOMIRI M, LI M, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of coarse aggregate reactive powder concrete (CA-RPC) bridge deck[J]. *Engineering Structures*, 2022, 271:114951.
- [8] AHMED S, AL-DAWOOD Z, ABED F, et al. Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete—a review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44:103238.
- [9] 鞠彦忠,王德弘,李秋晨,等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响[J]. *实验力学*, 2011, 26(3):254-260 (JU Yanzhong, WANG Dehong, LI Qiuchen, et al. On the influence of steel fiber volume fraction on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(3):254-260 (in Chinese))
- [10] WANG C, YANG C H, LIU F, et al. Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(4):538-544.
- [11] SHI C J, WU Z M, XIAO J F, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101:741-751.
- [12] WANG D H, SHI C J, WU Z M, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96:368-377.
- [13] SHAH H A, YUAN Q, PHOTWICHAI N. Use of materials to lower the cost of ultra-high-performance concrete—a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327:127045.
- [14] ZHAO B, XU Y X, PENG H, et al. Experiment and phase-field simulation of uniaxial compression of ultra-high-performance concrete with coarse aggregate[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2022, 25(10):2121-2136.
- [15] 何锐,嵇绍华,黄平明,等. 粗骨料/浆体界面性能对混凝土力学性能影响的数值模拟[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(2):31-37 (HE Rui, JI Shaohua, HUANG Pingming, et al. Numerical simulation of the effect of interface transition zone between mortar and aggregates on the mechanics properties of concrete[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(2):31-37 (in Chinese))
- [16] 史占崇,苏庆田,邵长宇,等. 粗骨料 UHPC 的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(12):86-97 (SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Changyu, et al. Basic mechanical behavior and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(12):86-97 (in Chinese))
- [17] 杨凤玲,嵇银行,刘伟,等. 含粗骨料超高性能混凝土的试验研究[J]. *混凝土*, 2018(12):110-113 (YANG

- Fengling, JI Yinxing, LIU Wei, et al. Experimental study on ultra-high-performance concrete with coarse aggregate[J]. *Concrete*, 2018(12):110—113 (in Chinese)
- [18] WANG J Q, LIU J P, WANG Z, et al. Cost-effective UHPC for accelerated bridge construction: material properties, structural elements, and structural applications[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(2): 04020117.
- [19] SAHMARAN M, LACHEMI M, HOSSAIN K M A, et al. Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites[J]. *ACI Materials Journal*, 2009, 106:308—316.
- [20] 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. Mechanical properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(11):1747—1755 (in Chinese))
- [21] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二):界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. *硅酸盐学报*, 2004(1):70—79 (CHEN Huisu, SUN Wei, Stroeven P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (II): mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004(1):70—79 (in Chinese))
- [22] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(一):实验技术[J]. *硅酸盐学报*, 2004(1):63—69 (CHEN Huisu, SUN Wei, Stroeven P. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (I): Experimental techniques[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004(1):63—69 (in Chinese))
- [23] LIU J Z, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121:310—318.
- [24] ZHANG L H, LIU J Z, LIU J P, et al. Effect of steel fiber on flexural toughness and fracture mechanics behavior of ultrahigh-performance concrete with coarse aggregate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(12):04018323.
- [25] WU F H, XU L H, CHI Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: the effect of coarse aggregate[J]. *Composite Structures*, 2020, 236:111810.
- [26] LI S H, MEJLHEDE J O, YU Q L. Influence of steel fiber content on the rate-dependent flexural performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 125935.
- [27] 沈楚琦, 李北星. 粗骨料对超高性能混凝土力学性能的影响及拟合分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(1):35—40 (SHEN Chuqi, LI Beixing. Effect of coarse aggregate on mechanical properties of ultra-high performance concrete and fitting analysis[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2021, 39(1):35—40 (in Chinese))
- [28] YU Z H, WU L S, ZHANG C, et al. Influence of distribution modulus on the compressive strength of ultra-high-performance concrete with coarse aggregate (UHPC-CA)[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(7):1—14.
- [29] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015 (Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese))
- [30] 郑晓博, 韩方玉, 刘建忠, 等. 粗骨料超高性能混凝土流变与稳定性[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11):42—52 (ZHENG Xiaobo, HAN Fangyu, LIU Jianzhong, et al. Rheological properties and stability of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(11):42—52 (in Chinese))
- [31] LIU J, LI C, DU Z, et al. Characterization of fiber distribution in steel fiber reinforced cementitious composites with low water-binder ratio[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2011, 18:449—457.
- [32] 钢纤维混凝土:JG/T 472—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015 (Steel fiber reinforced concrete: JG/T 472—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese))
- [33] 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(23):

- 115—119, 131 (CHENG Jun, LIU Jiaping, LIU Jianzhong, et al. An experimental study and a mechanism analysis on mechanical properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate[J]. Materials Reports, 2017, 31(23):115—119, 131 (in Chinese))
- [34] 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. Study on mechanical properties of ultra high performance concrete with coarse aggregate[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3):47—54 (in Chinese))
- [35] 王永霞. 含白云石粗骨料超高性能混凝土的性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(1):149—155 (WANG Yongxia. Properties of ultra-high performance concrete containing coarse dolomite aggregate[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(1):149—155 (in Chinese))
- [36] 叶庆阳, 薛聪聪, 余敏, 等. 超高性能混凝土配合比设计与抗压强度试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3):124—130, 141 (YE Qingyang, XUE Congcong, YU Min, et al. Mix proportion design and compressive strength test of ultra-high performance concrete[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3):124—130, 141 (in Chinese))
- [37] 混凝土结构通用规范: GB 55008—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021 (General code for concrete structures: GB 55008—2021[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021 (in Chinese))

Study on the mechanical properties of ultra-high performance concrete based on the distribution of coarse aggregates and steel fibers, and strength calculation model

LÜ Yigang¹, ZHANG Jinghang¹, CHEN Huowen², HAN Weiwei³,
HE Xianliang¹, HUANG Dunwen¹, PENG Hui¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Dahao Municipal Construction Co., Ltd., Shantou 515041, Guangdong, China; 3. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the comprehensive influence of the interaction between coarse aggregate and steel fiber on the properties of ultra-high performance concrete, the influence of the volume content of coarse aggregate and steel fiber on the mechanical properties of ultra-high performance concrete was studied. The section of the specimen was processed by Image-Pro Plus software to calculate the uniform distribution of coarse aggregate and steel fiber. The influence of coarse aggregate and steel fiber distribution on the performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate is obtained. The results show that when steel fiber content is constant, coarse aggregate volume content can increase the compressive strength of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate by up to 15.55%, but decrease the bending strength by 24.34%. When the content of coarse aggregate is constant, the compressive strength of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate can be improved by coupling reinforcement under the interlocking effect of steel fiber and aggregate, but excessive steel fiber is easy to aggregate, which will weaken the bridging effect of steel fiber and make the bending strength increase first and then decrease. Based on the influence of the interaction between coarse aggregate and steel fiber on mechanical properties, the calculation model of compressive strength and flexural strength under the dual variables of coarse aggregate content and steel fiber content is established. The calculation model is accurate and has certain reference value for engineering application.

Keywords: ultra high performance concrete; coarse aggregate distribution; steel fiber distribution; mechanical properties; calculation model