

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250628001

文章编号:1674-599X(2026)02-0108-07

引用格式:袁巧明,窦淑豪,张靖航,等.含粗骨料超高性能混凝土的抗折强度估算方法[J].交通科学与工程,2026,42(2):108-114.

Citation: YUAN Qiaoming, DOU Shuhao, ZHANG Jinghang, et al. Flexural strength estimation method for ultra-high performance concrete with coarse aggregate[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 108-114.

含粗骨料超高性能混凝土的抗折强度估算方法

袁巧明¹, 窦淑豪², 张靖航², 陈浩², 黄敦文²

(1. 湖北交投宜昌高速公路建设管理有限公司, 湖北 宜昌 443413; 2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】将粗骨料超高性能混凝土(ultra-high performance concrete-coarse aggregate, UHPC-CA)用于工程建设并大幅降低现浇工程的建造成本,同时提出UHPC-CA的抗折强度估算方法。【方法】探究不同养护条件下粗骨料的掺量与粒径、钢纤维掺量对UHPC-CA力学性能的影响,并分析抗折强度与抗压强度之间的统计关系。【结果】UHPC-CA的粗骨料粒径为5~<8 mm对混凝土工作性能和力学性能的提升效果最佳。在标准养护条件下,UHPC-CA的抗压强度随粗骨料掺量的增加呈先提升后降低的趋势,而抗折强度则呈单调递减趋势。当粗骨料掺量保持恒定时,UHPC-CA的抗压强度随钢纤维掺量的增加而单调上升,但抗折强度并未呈现单调增加的变化。【结论】当钢纤维掺量低于1%时,UHPC-CA的抗折强度与抗压强度的相关性规律与普通硅酸盐混凝土的相似,原抗折强度估算方法中的形函数拟合效果良好。但随着钢纤维掺量的增加,形函数的拟合效果逐渐变差。当钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量低于20%时,UHPC-CA的抗折强度与抗压强度的相关性规律与普通混凝土的截然不同。

关键词:超高性能混凝土;粗骨料掺量;钢纤维掺量;抗折强度;估算方法

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Flexural strength estimation method for ultra-high performance concrete with coarse aggregate

YUAN Qiaoming¹, DOU Shuhao², ZHANG Jinghang², CHEN Hao², HUANG Dunwen²

(1. Hubei Communications Investment Yichang Expressway Construction Management Co., Ltd., Yichang 443413, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] To apply ultra-high performance concrete with coarse aggregate (UHPC-CA) in engineering structures and significantly reduce construction costs for cast-in-place engineering, a method for estimating its flexural strength is proposed. [Methods] The effects of coarse aggregate content and particle size, as well as steel fiber content, on the mechanical properties of UHPC-CA under different curing conditions were experimentally studied. The statistical relationship between flexural strength and compressive strength was analyzed. [Findings] UHPC-CA with aggregate particle sizes of 5~<8 mm exhibits optimal improvement in workability and mechanical properties. Under standard curing conditions, the compressive strength of UHPC-CA first increases and then decreases with increasing coarse aggregate content, while the flexural strength shows a monotonic

收稿日期:2025-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52008036);湖南省自然科学基金项目(2024JJ5017);湖南省教育厅资助科研项目(22B0344)

通信作者:黄敦文(1990—),男,副教授,主要从事桥梁高性能材料与新结构体系方面的研究工作。

E-mail: dw.huang@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

decreasing trend. When coarse aggregate content is constant, the compressive strength of UHPC-CA increases monotonically with steel fiber content, while the flexural strength does not increase monotonically. [Conclusions] When steel fiber content is below 1%, the correlation between flexural strength and compressive strength of UHPC-CA is similar to that of ordinary Portland concrete, and the original shape function for flexural strength estimation shows good fitting performance. As steel fiber content increases, the fitting performance of the original shape function gradually deteriorates. When steel fiber content exceeds 1% and coarse aggregate content is below 20%, the correlation between flexural strength and compressive strength of UHPC-CA is fundamentally different from that of ordinary concrete.

Key words: ultra-high performance concrete; coarse aggregate content; steel fiber content; flexural strength; estimation method

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 能克服传统混凝土自重大、抗裂性差等缺点,在大跨度桥梁及高耸结构的建造与维护领域展现出良好的适用性^[1]。然而,由于 UHPC 的孔结构致密,其自收缩现象显著^[2-3],该材料严重依赖高温养护来降低材料的早龄期开裂风险,进而导致现浇 UHPC 工程的成本过高。基于此,部分学者开展研究,尝试通过外掺粗骨料的方式,减少同体积材料中的凝胶生成量,进而缓解 UHPC 的自收缩^[4-5],达到简化施工工艺、降低工程成本的目的。然而,若要将含粗骨料超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete - coarse aggregate, UHPC-CA) 应用于实际工程,抗折强度等力学指标与立方体抗压强度的对应关系是前期设计应关注的重点。

粗骨料和钢纤维的掺量是确定 UHPC-CA 配合比的关键因素。杨凤玲等^[6]通过试验研究了不同粗骨料和钢纤维掺量对 UHPC 工作性能和力学性能 (尤其是单轴拉伸性能) 的影响。研究发现,当粗骨料粒径为 10 mm、掺量为 20% 时, UHPC 的工作性能和力学性能较为理想。沈楚琦等^[7]发现,随着骨胶比的增大, UHPC 的流动性减小,力学性能呈现先增加后减小的趋势。杨简等^[8]指出, UHPC-CA 的抗压强度受到钢纤维掺量和长径比的共同影响,随着钢纤维掺量和长径比的增加,抗压强度增大,但流动性减小。杨洋等^[9]发现,当粗骨料粒径为 5~8 mm、掺量为 20%,且钢纤维掺量为 4% 时,抗压强度达到最大值。除配合比外,养护条件也对 UHPC 有显著影响,高原等^[10]发现,不同养护机制会影响 UHPC 的水化反应,进而导致其力学性能出现差异, UHPC 高温蒸养结束后进行标准养护,其抗压强度、轴心抗压强度均有所增加,但蒸养温度对抗折强度的影响较

小。陈聪聪等^[11]发现,钢纤维形貌与养护温度存在显著交互效应,端钩型纤维在热养条件下,界面增强优势更加突出,而平直纤维在常温养护中,裂缝控制性能更优。

除抗压强度外,抗折强度亦是材料性能的重要指标,特别是针对弯曲性能。苏捷等^[12]提出, UHPC 的抗折强度存在显著的尺寸效应,且这种尺寸效应会随着基体强度等级的提升而增强。同时,钢纤维掺量的增加会进一步放大该尺寸效应,其尺寸换算系数低于普通混凝土规范所规定的值。程俊等^[13]通过试验发现,粗骨料掺量对 UHPC 抗压强度的影响较小,但会显著降低抗折强度。另外采用端钩型钢纤维可显著提升抗折强度。吕毅刚等^[14]提出,适量掺入粗骨料对 UHPC-CA 的抗压强度有增强效应,然而,粗骨料的掺入会降低钢纤维在混凝土中的分散性,进而对 UHPC-CA 的抗折强度产生不利影响,并且随着粗骨料掺量的增加,抗折强度会持续下降。目前,关于 UHPC-CA 的研究大多聚焦于原料配合比对其工作性能和力学性能的影响,但鲜有研究给出可用于结构前期设计的抗折强度估算方法。本文旨在分析不同养护条件下,粗骨料掺量、粒径以及钢纤维掺量对 UHPC-CA 工作性能和力学性能的影响,进而通过统计分析明确抗折强度与抗压强度的对应关系,以为 UHPC-CA 的结构设计提供理论依据与数据支撑。

1 试验方法

1.1 原材料及配合比

本文采用湖南某厂的 52.5 号普通硅酸盐水泥,以江苏苏博特新材料股份有限公司提供的 SBT®-HDC(V) UHPC 掺合料作为胶凝材料,二者共

同构成了胶凝材料体系。纤维则选择尺寸为13 mm(长) \times 0.2 mm(直径)的平直型镀铜钢纤维,抗拉强度达2 500 MPa,弹性模量为210 GPa。细骨料选用了平均粒径为5 mm的精制石英砂,粗骨料则使用玄武岩碎石(crushed aggregate, CA),粒径分别为0~<5、5~<8、8~<10 mm,压碎指标为6.5%。此外,选用粉末状的聚羧酸酯高效减水剂,减水率>30%。拌合水都选用自来水,水胶比为0.16。UHPC粉末的配合比参数见表1。本文以粗骨料粒径、掺量及钢纤维掺量为变量,研究了UHPC-CA的力学性能,UHPC-CA配合比设计见表2。其中,粗骨料粒径分别为0~<5、5~<8、8~<10 mm,粗骨料掺量分别为0%、10%、20%、30%、40%,钢纤维掺量分别为0%、1%、2%、3%、4%。

表1 UHPC配合比参数

Table 1 Mix proportion parameters of UHPC

基础配合比/(kg·m ⁻³)			水胶比	减水剂掺量/%
水泥	掺合料	石英砂		
900	600	800	0.16	2

表2 UHPC-CA配合比设计

Table 2 Mix proportion design of UHPC-CA

	组号	粗骨料掺量/%	钢纤维掺量/%	粗骨料粒径/mm
粗骨料掺量组	CA1	0	2	0
	CA2	10	2	5~<8
	CA3	20	2	5~<8
	CA4	30	2	5~<8
	CA5	40	2	5~<8
钢纤维掺量组	SF1	20	0	5~<8
	SF2	20	1	5~<8
	SF3	20	2	5~<8
	SF4	20	3	5~<8
	SF5	20	4	5~<8
粗骨料粒径组	PS1	20	2	0~<5
	PS2	20	2	5~<8
	PS3	20	2	8~<10

1.2 试验方法

基于《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)开展试件工作性能试验。此外,依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)开展试件抗压强度、抗折强度试验。每组准备6个测试试件,经标准养护2 d后脱模,而后各取3个试件分别置于(23 \pm 0.5) °C、相对湿度大于95%的常温养护环境和(80 \pm 0.5) °C、相对湿度大于95%的高温养护环境下,且在养护7 d后进行强度测试。

2 结果与讨论

2.1 工作性能测试

不同粗骨料粒径、掺量及钢纤维掺量组合下,UHPC-CA的工作性能如图1所示。由图1可知,当粗骨料掺量从0%增大到40%时,扩展度由580 mm下降至310 mm;当钢纤维掺量从0%增大至4%时,拓展度从540 mm降低至320 mm。由此可见,随着粗骨料和钢纤维掺量的增加,UHPC-CA的扩展度显著减小。这或许是由于随着骨料表面积增大,被吸附的水分子数量增多,进而降低了混凝土的流动性。而钢纤维掺量的增加,不仅会提升吸附水量,而且会增加骨料颗粒之间的摩擦力,从而影响浆体的流动性。

相较于粗骨料和钢纤维的掺量,骨料粒径对UHPC-CA扩展度的影响相对较弱,但仍存在一个合适的粒径范围,能使混凝土的工作性能达到最优。由图1(c)可知,5~<8 mm粗骨料粒径范围下颗粒的流动性最佳。

2.2 抗压强度测试

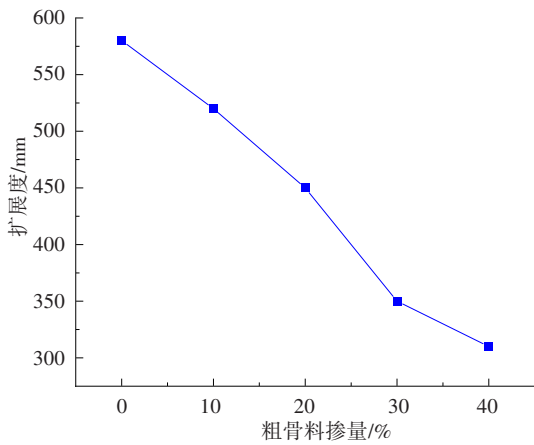
不同粗骨料粒径、掺量及钢纤维掺量组合下的UHPC-CA抗压强度测试结果如图2所示。

由图2(a)可知,当粗骨料粒径为5~<8 mm时,UHPC-CA的抗压强度达到最大值。

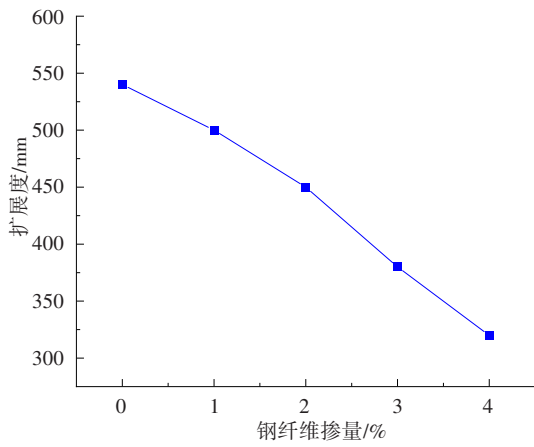
由图2(b)可知,试件抗压强度随粗骨料掺量的增加呈现先上升后下降的趋势,当粗骨料掺量为20%时,抗压强度达到最大值。其中,在标准养护条件下,掺入20%粗骨料的UHPC-CA抗压强度相较于不掺粗骨料的UHPC-CA抗压强度提升了8.37%;而在高温养护条件下,这一提升幅度达到17.67%。这表明,在高温养护条件下,加入粗骨料后UHPC-CA抗压强度的提升效果更为显著。

由图2(c)可知,纤维掺量组中试件抗压强度随纤维掺量增加呈单调递增的趋势,且标准养护与高温养护条件下的抗压强度差值逐渐增大。当纤维掺量为4%时,标准养护和高温养护条件下的抗压强度相较于不掺钢纤维的情况分别增长了36%、15%。这说明钢纤维对抗压强度的提升在标准养护条件下效果更为明显。

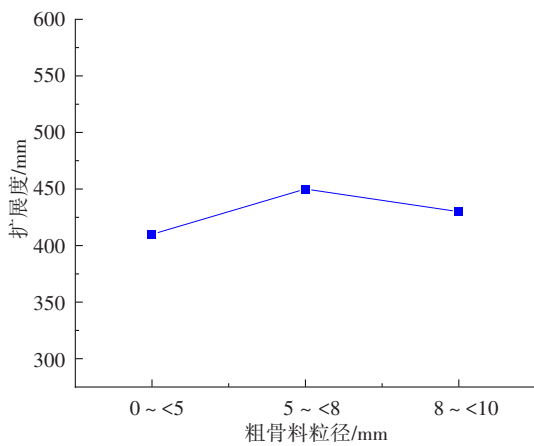
综上,钢纤维的掺量对UHPC-CA的强度增强效果最明显,其次是粗骨料的掺量。粗骨料和钢纤维可以增加混凝土的骨架结构,提高其承载能力,二



(a) 粗骨料掺量



(b) 钢纤维掺量

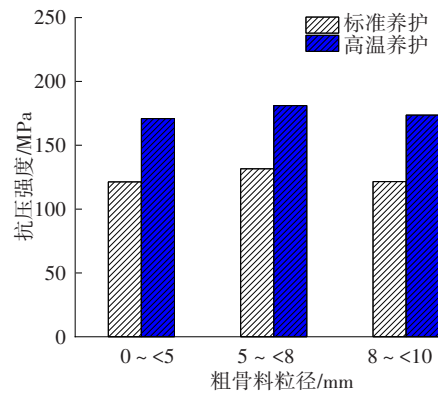


(c) 粗骨料粒径

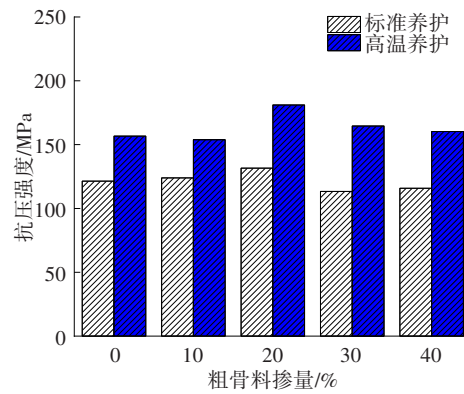
图1 各配合比下UHPC-CA的工作性能

Fig. 1 Workability of UHPC-CA under different mix proportion

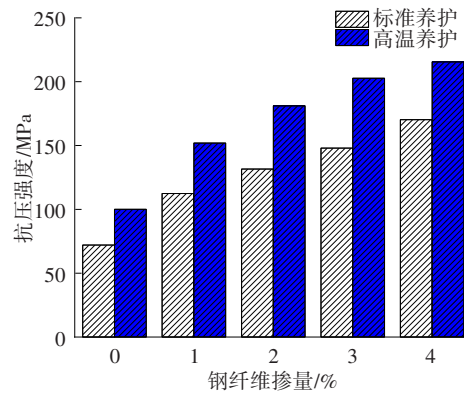
者的共同作用使得UHPC-CA具有更高的力学性能。当UHPC-CA中粗骨料掺量为20%、钢纤维掺量为2%时,标准养护条件下试件的抗压强度相较于高温养护且无粗骨料的情况下降较少。这表明在实际工程中,可通过添加粗骨料来提升UHPC的抗压强度,使其接近高温养护条件下UHPC的抗压强度水平。



(a) 粗骨料粒径



(b) 粗骨料掺量



(c) 钢纤维掺量

图2 各配合比下UHPC-CA的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of UHPC-CA under different mix proportion factors

2.3 抗折强度测试

不同粗骨料掺量、粒径及钢纤维掺量组合下的UHPC-CA抗折强度测试结果如图3所示。

从图3(a)可知,标准养护和高温养护下,粗骨料粒径组的最佳粒径尺寸均为5~8mm。其中,在标准养护情况下,5~8mm粒径对应的抗折强度相较于0~5mm粒径对应提升了40.55%。由图3(b)可知,在标准养护与高温养护下,混凝土的抗折强度均随着粗骨料掺量的增加呈单调递减趋势,不过

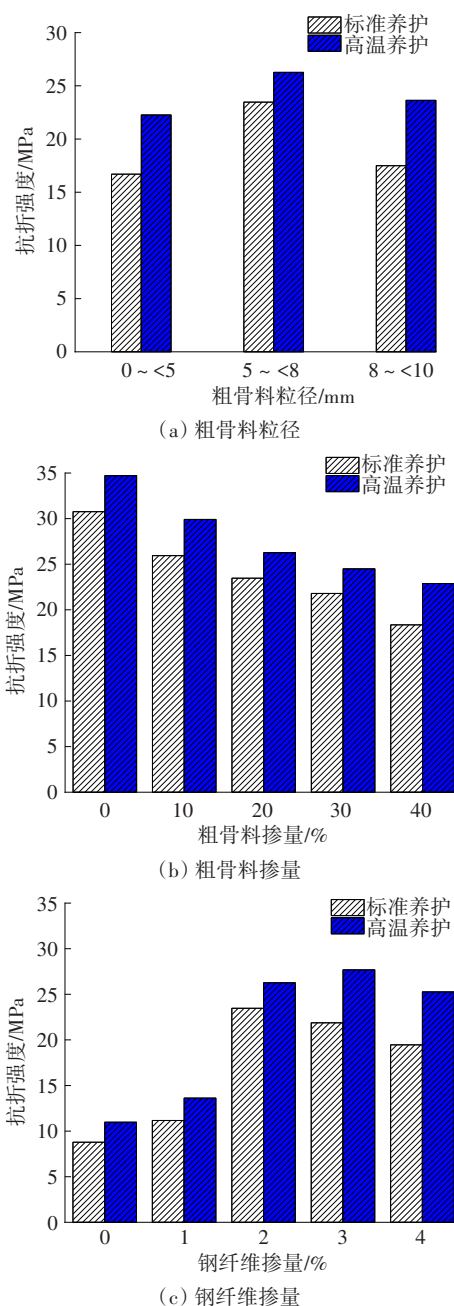


图3 各配合比下UHPC-CA的抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of UHPC-CA under different mix proportion

其下降幅度逐渐减小。当粗骨料掺量达到40%时,标准养护和高温养护条件下的抗折强度,相较于未添加粗骨料时的抗折强度分别下降了40.34%和34.09%。由图3(c)可知,标准养护条件下钢纤维的最佳掺量为2%时抗折强度最佳,此时对应的抗折强度为不掺钢纤维情况时的2.67倍。而在高温养护条件下,抗折强度达到最大时钢纤维的掺量为3%,对应的抗折强度为不掺钢纤维情况时的2.52倍。这说明在标准养护条件下,钢纤维对UHPC-CA

抗折强度的提升效果较优,且高温养护会使UHPC-CA中钢纤维的最佳掺量有所升高。

综上所述,随着粗骨料粒径和钢纤维掺量的增加,抗折强度呈现先上升后下降的变化趋势;而随着粗骨料掺量的增加,混凝土的抗折强度呈单调递减趋势。

2.4 抗折强度与抗压强度的相关性分析

为了便于UHPC-CA的结构设计,有必要构建抗折强度与抗压强度的对应关系。本文参考程俊等^[13]、LIU等^[15]、孙嘉伦等^[16]、明阳等^[17]得出的UHPC-CA抗折强度与抗压强度的测试数据,得到抗折强度与抗压强度的相关性,如图4所示。由图4可知,UHPC-CA的抗压强度与抗折强度之间并未呈现出单一的相关性,因此无法直接套用普通混凝土相关性公式中的形函数:

$$f_{fs} = \alpha f_{cs}^\beta \quad (1)$$

式中: f_{fs} 为抗折强度; f_{cs} 为抗压强度; α 和 β 是回归系数。

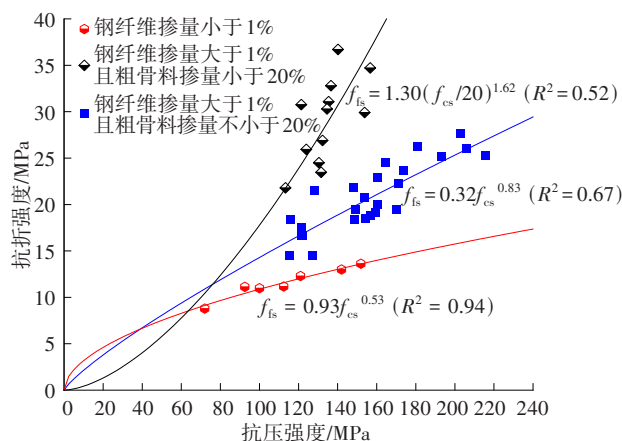


图4 抗折强度与抗压强度的相关性

Fig. 4 Correlation between flexural strength and compressive strength

从图4可知,当UHPC-CA中钢纤维掺量低于1%时,材料的抗折强度较低,其抗折强度 f_{fs} 与抗压强度 f_{cs} 的相关性符合式(1)的规律,可拟合成为:

$$f_{fs} = 0.93f_{cs}^{0.53} \quad (2)$$

式(2)的相关性系数 $R^2=0.94$ 。当钢纤维掺量大于1%时,测试数据大致呈现出两种不同的发展趋势,可依据粗骨料掺量分为两组,即粗骨料掺量不小于20%和粗骨料掺量小于20%。当钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量不小于20%时,可表示为:

$$f_{fs} = 0.32f_{cs}^{0.83} \quad (3)$$

式(3)的相关性系数 $R^2=0.67$ 。当钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量小于20%时,可表示为:

$$f_{fs} = 1.30 \left(\frac{f_{cs}}{20} \right)^{1.62} \quad (4)$$

式(4)的相关性系数 $R^2=0.52$ 。基于上述研究结论可知:当钢纤维掺量低于1%时,纤维在材料中所发挥的作用相对较弱,此时UHPC-CA的抗折强度与抗压强度之间的相关性,与普通混凝土的更接近,式(1)能适用。当钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量不小于20%时,由于粗骨料在材料中的体积占比较大,抗折强度与抗压强度的相关性规律仍符合式(1),但受钢纤维影响,回归拟合的精准程度有所降低。此外,当钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量小于20%时,钢纤维对材料性能的影响较为显著,式(1)难以准确描述抗折强度与抗压强度之间的相关性规律。

鉴于钢纤维掺量小于1%以及钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量不小于20%这两种情况符合式(1)的函数表达形式,按照复合材料计算方法,可将式(1)改写为:

$$f_{fs} = \alpha f_{cs}^\beta (1 + \alpha_f \lambda_f) \quad (5)$$

式中: α_f 是钢纤维对抗折强度的影响系数; λ_f 是钢纤维掺量特征参数,为钢纤维长细比与掺量的乘积。

将图4中粗骨料掺量不小于20%的数据重新拟合,拟合结果如图5所示,可得统一表达式:

$$f_{fs} = 0.95 f_{cs}^{0.566} (1 + \alpha_f \lambda_f) \quad (6)$$

式(6)的相关性系数 $R^2=0.78$ 。而钢纤维掺量大于1%且粗骨料掺量低于20%时,依然满足式(4)。

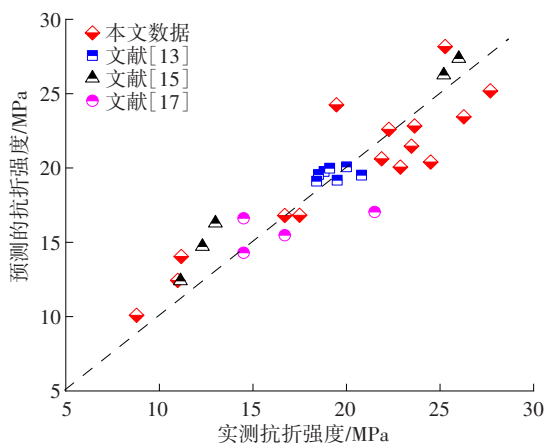


图5 抗折强度实测值与预测值对比

Fig. 5 Comparison of measured and predicted flexural strength

3 结论

本文通过试验研究了两种养护条件下,粗骨料掺量、粒径和钢纤维掺量对UHPC-CA性能的影响,得出以下主要结论:

1) 当骨料粒径为5~8 mm时,UHPC-CA的工作性能和力学性能最佳。随着粗骨料掺量的增加,UHPC-CA的抗压强度呈现先增大后减小的趋势,其中粗骨料掺量为20%时达到最优,此时标准养护条件下的抗压强度有显著提升。不过,UHPC-CA的抗折强度则随着粗骨料掺量的增加而呈单调递减的趋势。

2) UHPC-CA的抗压强度随钢纤维掺量的增加呈现单调递增趋势。然而由于钢纤维与粗骨料的团聚效应,UHPC-CA的抗折强度随钢纤维掺量的增加呈先增加后减小的趋势。在标准养护条件下,UHPC-CA的钢纤维最佳掺量为2%。

3) 当钢纤维掺量低于1%时,UHPC-CA的抗折强度与抗压强度的相关性与普通混凝土的更接近。当钢纤维掺量大于1%时,抗折强度与抗压强度的相关性应考虑钢纤维的影响,特别是在粗骨料掺量低于20%的情况下,这一影响尤为显著。

参考文献(References):

- [1] 黄祥,刘天舒,丁庆军.超高性能混凝土研究综述[J].混凝土,2019(9):36-38.
HUANG Xiang, LIU Tianshu, DING Qingjun. Review of research on ultra-high performance concrete [J]. Concrete, 2019(9): 36-38.
- [2] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095.
- [3] 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. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2013.06.003.
SHI Caijun, XIAO Jiangfan, CAO Zhang, et al. Effects of UHPC constituents on its properties [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(6): 1005-1011. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2013.06.003.
- [4] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.

- [5] 耿春雷, 许零, 陈红岩, 等. 活性粉末混凝土的研究与工程应用进展[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 70-73.
GENG Chunlei, XU Ling, CHEN Hongyan, et al. On research progress and application of reactive powder concrete[J]. Materials Review, 2012, 26(5): 70-73.
- [6] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2018.12.027.
YANG Fengling, JI Yinxing, LIU Wei, et al. Experimental study on ultra-high-performance concrete with coarse aggregate [J]. Concrete, 2018 (12) : 110-113. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2018.12.027.
- [7] 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. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.01.006.
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. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.01.006.
- [8] 杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652-658. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20190604.
YANG Jian, CHEN Baochun, SU Jiazhan. Effect of steel fiber on elastic modulus of ultra-high-performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48 (5) : 652-658. DOI: 10.14062/j. issn. 0454-5648.20190604.
- [9] 杨洋, 肖博文, 李洪舟, 等. 粗骨料对超高性能混凝土中钢筋黏结性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 62-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202405272024101990.
YANG Yang, XIAO Bowen, LI Hongzhou, et al. Influence of coarse aggregates on bonding performance of steel reinforcements in ultra-high performance concrete [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40 (5) : 62-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202405272024101990.
- [10] 高原, 石红磊, 高全青, 等. 不同养护制度对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 混凝土, 2021(6): 108-111.
GAO Yuan, SHI Honglei, GAO Quanqing, et al. Influence of different curing regimes on the mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. Concrete, 2021(6): 108-111.
- [11] 陈聪聪, 吴泽媚, 胡翔, 等. 钢纤维形状和养护制度对超高性能混凝土强度及韧性的影响[J]. 材料导报, 2024, 38(15): 135-145. DOI:10.11896/cldb.23030088.
CHEN Congcong, WU Zemei, HU Xiang, et al. Influence of steel fiber shape and curing system on strength and toughness of UHPC[J]. Materials Reports, 2024, 38(15): 135-145. DOI:10.11896/cldb.23030088.
- [12] 苏捷, 史才军, 黄泽恩, 等. 粗骨料掺量对超高性能混凝土抗压强度尺寸效应的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2416-2422. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210401.
SU Jie, SHI Caijun, HUANG Zeen, et al. Scale effect on cubic compressive strength on ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49 (11) : 2416-2422. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20210401.
- [13] 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 Review, 2017, 31(23): 115-119, 131.
- [14] 吕毅刚, 张靖航, 陈火文, 等. 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[J]. 实验力学, 2024, 39(3): 345-355. DOI:10.7520/1001-4888-23-152.
LYU Yigang, ZHANG Jinghang, CHEN Huowen, et al. Study on the mechanical properties of ultra-high performance concrete based on the distribution of coarse aggregates and steel fibers, and strength calculation model [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2024, 39(3): 345-355. DOI:10.7520/1001-4888-23-152.
- [15] LIU S B, ZHANG Y L. Static mechanical properties and microscopic analysis of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete with coarse aggregate [J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022 (1) : 4529993. DOI:10.1155/2022/4529993.
- [16] 孙嘉伦, 张春晓, 毛继泽, 等. 养护制度对超高性能混凝土强度的影响机理[J]. 材料导报, 2024, 38(18): 62-66. DOI:10.11896/cldb.23050059.
SUN Jialun, ZHANG Chunxiao, MAO Jize, et al. Affecting mechanism of curing regimes on the strength of ultra-high performance concrete [J]. Materials Reports, 2024, 38 (18) : 62-66. DOI: 10.11896/cldb.23050059.
- [17] 明阳, 陈平, 李玲, 等. 超高性能混凝土的配制及性能研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(4): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8098.2021.04.008.
MING Yang, CHEN Ping, LI Ling, et al. Research and application of ultra high performance concrete powdery material [J]. Non-Metallic Mines, 2021, 44(4) : 26-29. DOI:10.3969/j.issn.1000-8098.2021.04.008.

(责任编辑:薛仪;校对:石月珍)