

增加纤维对 UHPC 力学性能的影响研究

王 栋

(中交路建交通科技有限公司, 北京 101300)

[摘要] 为研究超高性能混凝土(UHPC)掺入纤维后的力学性能变化规律,依托重庆某小区高层住宅楼工程,采用室内试验方法研究单掺纤维和双掺纤维时 UHPC 抗压强度和抗折强度。研究表明,在单掺纤维且龄期为 56d 条件下,当玄武岩纤维单掺量为 0.38%、玻璃纤维单掺量为 0.38%、聚丙烯纤维单掺量为 0.18%时,玄武岩纤维 UHPC、玻璃纤维 UHPC 及聚丙烯纤维 UHPC 抗压强度和抗折强度均为最大;在双掺纤维、龄期为 56d 条件下,当玄武岩纤维掺量为 0.38%、玻璃纤维和聚丙烯纤维掺量均为 0.18%时,可有效提高玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 力学性能。进行建筑设计时,应根据玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 力学特点,合理确定构件截面尺寸、配筋方式和连接构造,从而提高结构空间利用率。

[关键词] 超高性能混凝土;玄武岩纤维;玻璃纤维;聚丙烯纤维;抗压强度;抗折强度

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0139-06

Influence of Increasing Fibers on Mechanical Properties of UHPC

WANG Dong

(China Communications Construction Transportation Technology Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: To study the change law of mechanical properties of ultra-high performance concrete (UHPC) mixed with fibers, the compressive strength and flexural strength of UHPC mixed with single fiber and double fiber were studied by an indoor test method based on a high-rise residential building project in Chongqing. The results indicate that under the conditions of single fiber and a period of 56 days, when the single content of basalt fiber is 0.38%, the single content of glass fiber is 0.38%, and the single content of polypropylene fiber is 0.18%, the compressive strength and flexural strength of basalt fiber UHPC, glass fiber UHPC, and polypropylene fiber UHPC are the largest. Under the conditions of double-doped fiber and a period of 56 days, when the content of basalt fiber is 0.38% and the content of glass fiber and polypropylene fiber is both 0.18%, the mechanical properties of basalt-glass hybrid fiber and basalt-polypropylene hybrid fiber UHPC can be effectively improved. In the design of building structures, the section size, reinforcement method, and connection structure of components should be reasonably determined according to the mechanical characteristics of basalt-glass hybrid fiber and basalt-polypropylene hybrid fiber UHPC to improve the utilization rate of structural space.

Keywords: ultra-high performance concrete; basalt fibers; glass fibers; polypropylene fibers; compressive strength; flexural strength

0 引言

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)常用于高层建筑梁柱结构中,在 UHPC 中掺入不同种类的纤维,可显著改善混凝土的抗压强度和抗拉性能。为研究 UHPC 掺入纤维的最佳掺量,林华明^[1]对超高韧性纤维混凝土配合

比设计及力学性能进行了研究,结果表明,优化配合比后的超高韧性纤维混凝土相比未优化前具备更高的抗裂能力;胡利等^[2]研究了 UHPC 动力性能,结果表明,钢纤维能有效阻碍裂缝发展,从而增强 UHPC 抗压性能;王雄锋等^[3]采用室内试验研究了纤维混掺 UHPC 抗冲磨与拉伸性能;曾旺^[4]采用室内试验研究了混杂纤维对玄武岩机制砂 UHPC 性能的影响;杜杰贵等^[5]研究了纤维混掺 UHPC 流

动性与抗压强度,结果表明,当纤维掺量增加时,UHPC 扩展度减小。以上学者通过室内试验研究了纤维混掺 UHPC 力学性能,但未涉及单掺纤维和双掺纤维 UHPC 力学性能的对比分析。

在 UHPC 设计中,李凯等^[6]对不同搅拌工艺下 UHPC 配合比设计及性能进行了研究,结果表明,振动搅拌可显著提高 UHPC 性能;宋天成等^[7]采用室内试验方法,对 UHPC 配合比设计进行了研究;徐鑫磊等^[8]研究了不同配合比对 UHPC 早期性能的影响,结果表明,钢纤维的掺入能有效提高 UHPC 抗折强度;陈晟豪等^[9]对钢渣微粉 UHPC 配合比进行了优化设计,结果表明,钢纤维体积掺量对钢渣微粉 UHPC 力学性能影响显著;朱超等^[10]利用再生复合微粉和风积沙分别部分取代水泥和天然河砂制备 UHPC,基于紧密堆积理论,采用修正的安德森模型对 UHPC 胶凝材料和细骨料颗粒配合比进行计算,得到紧密堆积状态下 UHPC 颗粒计算配合比。以上学者对 UHPC 配合比进行了研究,并对其搅拌工艺进行了分析。然而,不同种类纤维单掺和双掺时对 UHPC 力学性能的影响研究较少。基于此,本文依托重庆某小区高层住宅楼工程,采用室内试验分析 UHPC 中单掺纤维和双掺纤维抗压强度和抗折强度变化规律。

1 工程概况

重庆某小区高层住宅楼工程共有 32 栋高层电梯房,地上 15 层,地下 1 层。总建筑面积约 $5.691\times 10^5\text{m}^2$,其中地上建筑面积 $4.463\times 10^5\text{m}^2$,地下建筑面积 $1.228\times 10^5\text{m}^2$ 。建筑结构形式为框架-剪力墙结构,工程等级为一级,混凝土浇筑总量约 $9.62\times 10^4\text{m}^3$,建筑部分剪力墙、框架柱及墙柱连接区域均采用 UHPC,通过增加纤维提高 UHPC 力学性能。

2 试验概况

2.1 试验材料

水泥采用 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥,28d 抗压强度为 59.6MPa,掺合料为粉煤灰和矿粉,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,烧失量为 1.86%,矿粉烧失量为 0.95%。采用的细集料为天然河砂,细度模数为 2.6,粒径级配良好,性能指标符合规范要求,粗骨料为花岗岩碎石,粒径 10~25mm。选取了 3 种纤维,分别为玄武岩纤维、玻璃纤维和聚丙烯纤维,如图 1 所示。玄武岩纤维长 15mm,直径 $17.5\mu\text{m}$;玻璃纤维长 50mm,直径 $17.2\mu\text{m}$;聚丙烯纤维长 5mm,直径 $30\mu\text{m}$ 。减水剂采用聚羧酸减水剂,呈粉末状,减水量>30%。

UHPC 基体配合比为水泥:粉煤灰:矿粉:天

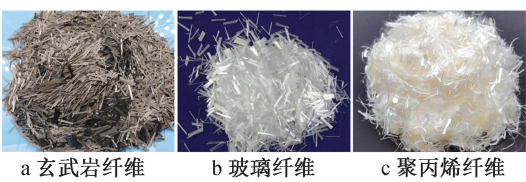


图 1 纤维材料
Fig. 1 Fiber material

然河砂:水:减水剂 = 856.5 : 185.6 : 182.3 : 1 216.5 : 225.6 : 9.5kg/m³,水胶比为 0.18。在 UHPC 基体上增加不同类型的纤维,为确保试验精度,各制作 6 个不同类型的试件,其中 3 个边长 150mm 立方体试件进行抗压强度试验,另外 3 个棱柱体试件进行抗折强度试验,试件尺寸为 600mm×150mm×150mm(长×宽×高)。试件制作完成后进行编号,并进行标准养护,标准养护室温度保持在 20±2℃,相对湿度保持在 95% 以上,养护龄期分为 7, 28,56d。

2.2 试验方法

采用微机控制电液伺服压力试验机测试 UHPC 力学性能(见图 2),该试验机最大试验力为 3 000kN,试验力测试范围为 4%~100%,准确度等级为 0.5 级,加力速度范围为 1~100kN/s。根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,对不同类型的混凝土试件进行力学性能试验,试验加荷速度为 0.8~1.0MPa/s,试验过程中,试验设备自动记录数据,直至试件破坏。



图 2 微机控制电液伺服压力试验机
Fig. 2 Microcomputer controlled electro-hydraulic servo pressure testing machine

2.3 试验方案

为研究不同纤维掺量 UHPC 力学性能,本试验设置了 3 种纤维,单掺纤维时,每种纤维均设置 4 种不同的掺量,分别为 0.18%, 0.38%, 0.58%, 0.78%,试验结束后,以未掺入纤维的 UHPC 基体为对照,对单掺纤维 UHPC 力学性能进行分析。当

UHPC 掺入 2 种纤维时,固定玄武岩纤维掺量为 0.38%,分别调整玻璃纤维和聚丙烯纤维掺量,在 2 种纤维掺量下,以单掺玄武岩纤维 UHPC 为对照,对抗压强度和抗折强度进行了分析。对不同纤维掺量下 UHPC 试件进行编号,如表 1 所示,编号中 U 表示 UHPC,X 表示玄武岩纤维,B 表示玻璃纤维,J 表示聚丙烯纤维,基体编号为 U-0,玄武岩纤维单掺 0.18%时的试件编号为 U-X18,掺入 0.38%玄武岩纤维和 0.18%玻璃纤维的试件编号为 U-X38-B18。

表 1 试验掺量设计
Table 1 Experimental dosage design

编号	玄武岩纤维 掺量/%	玻璃纤维 掺量/%	聚丙烯纤维 掺量/%
U-0	—	—	—
U-X18	0.18	—	—
U-X38	0.38	—	—
U-X58	0.58	—	—
U-X78	0.78	—	—
U-B18	—	0.18	—
U-B38	—	0.38	—
U-B58	—	0.58	—
U-B78	—	0.78	—
U-J18	—	—	0.18
U-J38	—	—	0.38
U-J58	—	—	0.58
U-J78	—	—	0.78
U-X38-B18	0.38	0.18	—
U-X38-B38	0.38	0.38	—
U-X38-B58	0.38	0.58	—
U-X38-B78	0.38	0.78	—
U-X38-J18	0.38	—	0.18
U-X38-J38	0.38	—	0.38
U-X38-J58	0.38	—	0.58
U-X38-J78	0.38	—	0.78

3 不同种类纤维单掺对 UHPC 力学性能的影响
3.1 玄武岩纤维

当玄武岩纤维单掺量为 0.18%, 0.38%, 0.58%, 0.78%时,以未掺入纤维的 UHPC 基体为对照,在 7,28,56d 龄期下,UHPC 抗压强度和抗折强度如图 3 所示。

由图 3 可知,随着玄武岩纤维掺量的增大,不同龄期玄武岩纤维 UHPC 抗压强度呈先增大后减小趋势。在 7d 龄期条件下,U-0 试件抗压强度为 75.49MPa,当玄武岩纤维掺量为 0.38%时,U-X38 试件抗压强度达最大,为 83.9MPa,相比 U-0 试件抗压强度增大了 11.14%,当玄武岩纤维掺量继续增大时,UHPC 抗压强度逐渐减小。在 28d 龄期条件下,UHPC 抗压强度变化与龄期 7d 时基本一致,当玄武岩纤维掺量为 0.38%时,U-X38 试件抗压强度

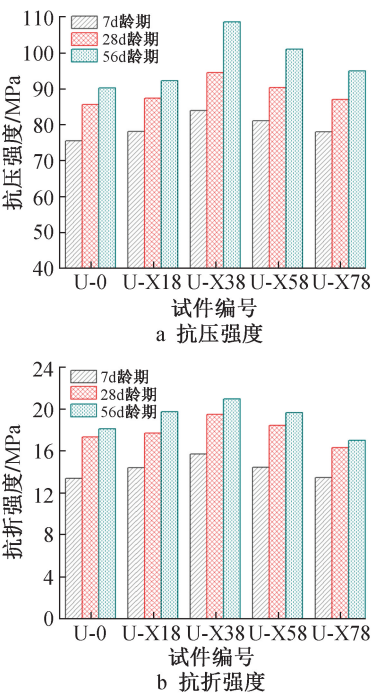


图 3 单掺玄武岩纤维 UHPC 力学性能
Fig.3 Mechanical properties of UHPC with single basalt fiber

较 U-0 试件增大 10.47%。在 56d 龄期条件下,玄武岩纤维掺量为 0.38%时,U-X38 试件抗压强度较 U-0 试件增大 19.96%,增大幅度明显。当龄期为 56d 时,U-X38 试件抗压强度为 108.6MPa,相比龄期为 7d 时增大了 29.44%。

随着玄武岩纤维掺量的增大,不同龄期玄武岩纤维 UHPC 抗折强度呈先增大后减小趋势,当玄武岩纤维掺量为 38%时,UHPC 抗折强度最大。当龄期分别为 7,28,56d 时,U-0 试件抗折强度分别为 13.39,17.34,18.13MPa,U-X38 试件抗折强度分别较 U-0 试件增大 17.40%,12.34%,15.55%。U-X38 试件 7d 抗折强度为 15.72MPa,56d 抗折强度为 20.95MPa,增大了 33.27%。

综上所述,随着玄武岩纤维掺量的增加,不同龄期玄武岩纤维 UHPC 抗压强度和抗折强度均呈先增大后减小趋势,且抗压强度增大幅度较明显。当玄武岩纤维掺量为 38%时,UHPC 抗压强度和抗折强度最大,且龄期越长抗压强度和抗折强度越大。

3.2 玻璃纤维

当玻璃纤维单掺量为 0.18%, 0.38%, 0.58%, 0.78%时,7,28,56d 龄期下不同玻璃纤维掺量 UHPC 抗压强度和抗折强度如图 4 所示。

由图 4 可知,随着玻璃纤维掺量的增大,不同龄期玻璃纤维 UHPC 抗压强度均呈先增大后减小趋势。在龄期为 7,28,56d 条件下,当玻璃纤维掺量为

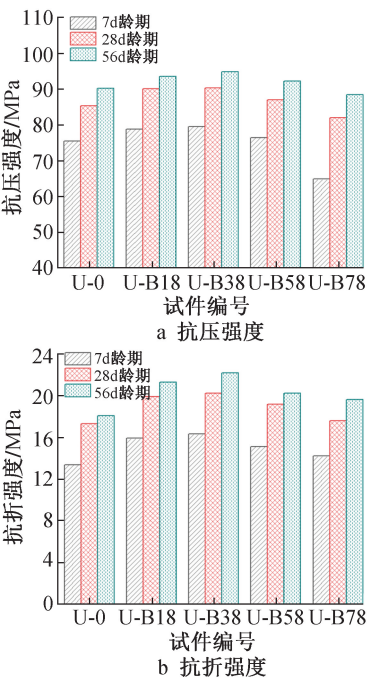


图 4 单掺玻璃纤维 UHPC 力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of UHPC with single glass fiber addition

0.38%时,U-B38 试件抗压强度最大,分别为 79.55, 90.3,94.89MPa,相比 U-0 试件抗压强度分别增大了 5.38%,5.74%,5.20%,增大幅度较小。在相同玻璃纤维掺量下,随着龄期的增大,UHPC 抗压强度逐渐增大,其中 U-B38 试件 56d 抗压强度较 7d 抗压强度增大了 19.28%。

随着玻璃纤维掺量的增大,不同龄期玻璃纤维 UHPC 抗折强度均呈先增大后减小的趋势,U-B38 试件抗折强度最大。U-B38 试件 7,28,56d 抗折强度分别为 16.35,20.29,22.24MPa,相比 U-0 试件抗折强度分别增大了 22.11%,17.01%,22.67%。相同玻璃纤维掺量下,龄期越长 UHPC 抗折强度越大,其中 U-B38 试件 56d 抗折强度分别较 7,28d 抗折强度增大了 36.02%,9.61%。

综上所述,随着玻璃纤维掺量的增大,不同龄期 UHPC 抗压强度和抗折强度均呈先增大后减小趋势,当玻璃纤维掺量为 0.38%时,抗压强度和抗折强度最大。在相同玻璃纤维掺量下,龄期越长,UHPC 抗压强度和抗折强度越大。玻璃纤维 UHPC 最大抗压强度小于玄武岩纤维 UHPC,最大抗折强度大于玄武岩纤维 UHPC。

3.3 聚丙烯纤维

当聚丙烯纤维单掺量为 0.18%,0.38%,0.58%,0.78%时,7,28,56d 龄期下不同聚丙烯纤维

掺量 UHPC 抗压强度和抗折强度如图 5 所示。

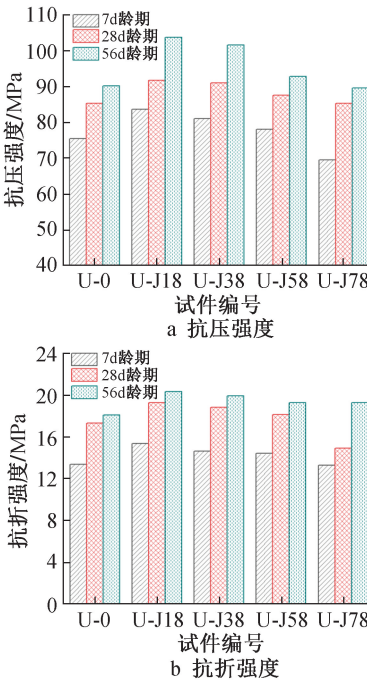


图 5 单掺聚丙烯纤维 UHPC 力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of UHPC with single addition of polypropylene fiber

由图 5 可知,随着聚丙烯纤维掺量的增大,不同龄期聚丙烯纤维 UHPC 抗压强度均呈先增大后减小趋势。当聚丙烯纤维掺量为 0.18%时,UHPC 抗压强度最大,在龄期为 7,28,56d 条件下,抗压强度分别为 83.7,91.82,103.80MPa,相比未掺入聚丙烯纤维时分别增大 10.88%,7.52%,15.08%。U-J18 试件 56d 抗压强度较 7,28d 抗压强度分别增大 24.01%,13.05%,增大幅度明显。

随着聚丙烯纤维掺量的增大,不同龄期聚丙烯纤维 UHPC 抗折强度与抗压强度变化趋势基本一致。在相同聚丙烯纤维掺量下,UHPC 56d 抗折强度最大。当聚丙烯纤维掺量为 0.18%时,UHPC 抗折强度最大,在龄期为 7,28,56d 条件下,抗折强度分别为 15.39,19.31,20.37MPa,相比未掺入聚丙烯纤维时分别增大了 14.94%,11.36%,12.36%。

综上所述,随着聚丙烯纤维掺量的增大,不同龄期聚丙烯纤维 UHPC 抗压强度与抗折强度均呈先增大后减小趋势。当聚丙烯纤维掺量为 0.18%时,UHPC 抗压强度和抗折强度均最大。聚丙烯纤维 UHPC 最大抗压强度小于玄武岩纤维 UHPC、大于玻璃纤维 UHPC,最大抗折强度小于玄武岩纤维 UHPC 和玻璃纤维 UHPC。

4 不同种类纤维双掺对 UHPC 力学性能的影响

4.1 玄武岩-玻璃混杂纤维

以单掺 0.38% 玄武岩纤维 UHPC 试件作为对照,当玄武岩纤维掺量为 0.38%、玻璃纤维掺量分别为 0.18%,0.38%,0.58%,0.78% 时,UHPC 抗压强度和抗折强度如图 6 所示。

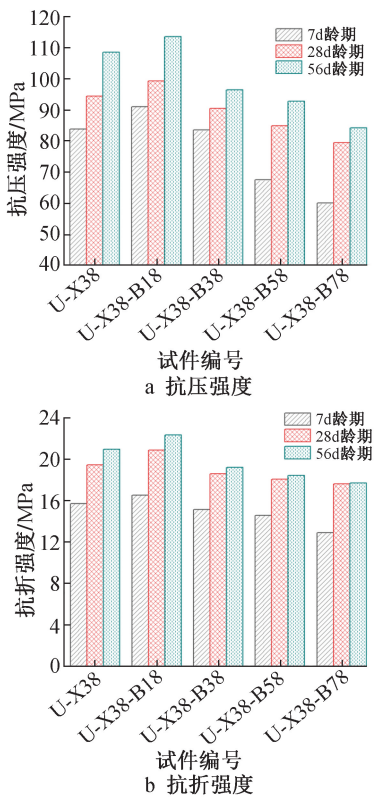


图 6 玄武岩-玻璃混杂纤维 UHPC 力学性能
Fig. 6 Mechanical properties of UHPC with basalt fiber and glass fiber content

由图 6 可知,在玄武岩纤维掺量为 0.38% 条件下,随着玻璃纤维掺量的增大,不同龄期玄武岩-玻璃混杂纤维 UHPC 抗压强度均呈先增大后减小趋势。当玄武岩纤维掺量为 0.38%、玻璃纤维掺量为 0.18% 时,U-X38-B18 试件抗压强度最大,7,28,56d 最大抗压强度分别为 91.09,99.34,113.58MPa,较 U-X38 试件分别增大了 8.57%,5.11%,4.59%。当玄武岩-玻璃混杂纤维掺量相同时,随着龄期的增加,UHPC 抗压强度逐渐增大。

当玄武岩纤维掺量为 0.38% 时,随着玻璃纤维掺量的增大,不同龄期玄武岩-玻璃混杂纤维 UHPC 抗折强度与抗压强度变化趋势基本一致。当玄武岩纤维掺量为 0.38%、玻璃纤维掺量为 0.18% 时,U-X38-B18 试件抗折强度最大,7,28,56d 最大抗折强度分别为 16.54,20.88,22.36MPa,相比 U-X38 试件抗折强度分别增大了 5.22%,7.19%,6.73%。当

纤维掺量相同时,随着龄期的增加,UHPC 抗折强度逐渐增大。

4.2 玄武岩-聚丙烯混杂纤维

以单掺 0.38% 玄武岩纤维 UHPC 试件作为对照,当玄武岩纤维掺量为 0.38%、聚丙烯纤维掺量分别为 0.18%,0.38%,0.58%,0.78% 时,玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度如表 2 所示。

表 2 玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度
Table 2 UHPC compressive strength under different basalt polypropylene fiber content

龄期/d	试件抗压强度/MPa				
	U-X38	U-X38-J18	U-X38-J38	U-X38-J58	U-X38-J78
7	83.90	93.53	85.37	71.69	63.97
28	94.51	105.77	95.81	87.54	83.47
56	108.60	119.00	109.13	93.62	91.01

由表 2 可知,当玄武岩纤维掺量为 0.38% 时,随着聚丙烯纤维掺量的增大,不同龄期玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度均呈先增大后减小趋势。当玄武岩纤维掺量为 0.38%、聚丙烯纤维掺量为 0.18% 时,U-X38-J18 试件抗压强度最大,7,28,56d 最大抗压强度分别为 93.53,105.77,119MPa,较 U-X38 试件抗压强度分别增大 11.48%,11.91%,9.58%。当纤维掺量相同时,随着龄期的增加,玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度逐渐增大。当玄武岩纤维掺量为 0.38%、聚丙烯纤维掺量为 0.18% 时,玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 56d 抗压强度最大。

当玄武岩纤维掺量为 0.38%、聚丙烯纤维掺量分别为 0.18%,0.38%,0.58%,0.78% 时,玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗折强度如表 3 所示。

表 3 玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗折强度
Table 3 Flexural strength of UHPC under different basalt polypropylene fiber content

龄期/d	试件抗折强度/MPa				
	U-X38	U-X38-J18	U-X38-J38	U-X38-J58	U-X38-J78
7	15.72	15.77	15.27	14.94	14.18
28	19.48	19.60	18.92	18.21	18.00
56	20.95	21.19	19.57	18.76	18.15

由表 3 可知,在玄武岩纤维掺量为 0.38% 条件下,随着聚丙烯纤维掺量的增加,不同龄期玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗折强度与抗压强度变化趋势基本一致。在不同龄期下,U-X38-J18 试件抗折强度最大。U-X38-J18 试件 7,28,56d 抗折强度分别为 15.77,19.6,21.19MPa,较 U-X38 试件抗折强度分别增大了 0.32%,0.62%,1.15%,增大幅度较小。当纤维掺量相同时,龄期越长,玄武岩-聚丙烯

烯混杂纤维 UHPC 抗折强度越大。当玄武岩纤维掺量为 0.38%、聚丙烯纤维掺量为 0.18% 时,玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 56d 抗折强度最大。玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 最大抗压强度大于玄武岩-玻璃混杂纤维 UHPC,最大抗折强度小于玄武岩-玻璃混杂纤维 UHPC。

5 施工建议

制备双掺纤维 UHPC 时,选用高强度等级硅酸盐水泥,选择的玄武岩纤维应直径均匀、长度合适、强度高且耐碱性能良好,如果玄武岩纤维长度>20mm,易导致纤维缠绕、团聚,影响 UHPC 工作性能。选用玻璃纤维时,优先选用耐碱玻璃纤维,制备 UHPC 前,应对玻璃纤维和聚丙烯纤维表面进行特殊处理,以增强与水泥基体的黏结力。进行建筑结构设计时,根据玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 力学性能特点,合理确定构件截面尺寸、配筋方式和连接构造,由于混杂纤维 UHPC 具有高强度和高韧性的特点,设计时可适当减小构件截面尺寸,但应确保结构稳定性和安全性。

6 结语

1)当 UHPC 中单掺玄武岩纤维、玻璃纤维及聚丙烯纤维时,随着纤维掺量的增加,UHPC 抗压强度与抗折强度均呈先增大后减小趋势。在龄期为 56d 条件下,当玄武岩纤维和玻璃纤维单掺量均为 0.38%、聚丙烯纤维单掺量为 0.18% 时,单掺玄武岩纤维、玻璃纤维及聚丙烯纤维 UHPC 抗压强度和抗折强度均达到最大。

2)当玄武岩纤维掺量为 0.38% 时,随着玻璃纤维、聚丙烯纤维掺量的增大,不同龄期下玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度和抗折强度均呈先增大后减小趋势。在龄期为 56d 条件下,当玄武岩纤维掺量为 0.38%、玻璃纤维和聚丙烯纤维掺量均为 0.18% 时,玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 抗压强度和抗折强度均达到最大。

3)制备玄武岩-玻璃混杂纤维、玄武岩-聚丙烯混杂纤维 UHPC 混凝土时,选用高强度等级硅酸盐水泥,直径均匀、长度合适、高强度玄武岩纤维及耐碱玻璃纤维。

参考文献:

[1] 林华明. 超高韧性纤维混凝土配合比设计及力学性能研究[J]. 中国建筑金属结构,2023,22(10):96-98.
LIN H M. Mix proportion design and mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced concrete [J]. China construction metal structure,2023,22(10):96-98.

[2] 胡利,李映春,唐梓棋,等. 基于 SHPB 试验的超高性能混凝土动力性能研究[J]. 防护工程,2023,45(5):13-21.
HU L,LI Y C,TANG Z Q,et al. Study on dynamic performance of ultra-high performance concrete based on SHPB test [J]. Protective engineering,2023,45(5):13-21.

[3] 王雄峰,陈波,张晓闯,等. 纤维混掺超高性能混凝土抗冲磨与拉伸性能研究[J]. 水利学报,2023,54(10):1248-1256.
WANG X F,CHEN B,ZHANG X C,et al. Study on the tensile property and abrasion resistance of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete[J]. Journal of hydraulic engineering,2023,54(10):1248-1256.

[4] 曾旺. 混杂纤维对玄武岩机制砂超高性能混凝土性能影响研究[D]. 抚州:东华理工大学,2023.
ZENG W. Study on the effects of multi-fibers and different blending amounts on the performance of ultra-high performance concrete of machine-made sand[D]. Fuzhou:East China Institute of Technology,2023.

[5] 杜志贵,王雄峰,陈波,等. 纤维混掺超高性能混凝土流动性与抗压强度研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(15):73-78.
DU J G,WANG X F,CHEN B,et al. Study on flowability and compressive strength of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. Construction technology,2023,52(15):73-78.

[6] 李凯,张飞龙,魏丙华,等. 不同搅拌工艺下 UHPC 配合比设计及性能分析[J]. 施工技术(中英文),2022,51(12):122-124,130.
LI K,ZHANG F L,WEI B H,et al. Mix design and performance analysis of ultra-high performance concrete under different mixing modes [J]. Construction technology,2022,51(12):122-124,130.

[7] 宋天威,左彦峰,姚越. 超高性能混凝土配合比设计及搅拌工艺研究综述[J]. 混凝土世界,2023(10):86-90.
SONG T W,ZUO Y F,YAO Y. A review of ultra-high performance concrete ratio design and mixing process research [J]. China concrete,2023(10):86-90.

[8] 徐鑫磊,游其勇. 不同配合比对 UHPC 早期性能的影响[J]. 武汉轻工大学学报,2023,42(5):63-68.
XU X L,YOU Q Y. The effect of different mixture ratios on the early performance of UHPC [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University,2023,42(5):63-68.

[9] 陈晟豪,唐咸远,马杰灵,等. 基于正交试验的钢渣微粉 UHPC 配合比优化设计[J]. 广西科技大学学报,2023,34(2):52-60.
CHEN S H,TANG X Y,MA J L,et al. Optimization of the mix proportion of steel slag UHPC based on orthogonal test [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology,2023,34(2):52-60.

[10] 朱超,刘笑歌,林鑫,等. 基于紧密堆积理论的风积沙-再生复合微粉 UHPC 配合比设计及验证[J]. 福州大学学报(自然科学版),2023,51(2):243-249.
ZHU C,LIU X G,LIN X,et al. Design and validation of UHPC mix ratio incorporating aeolian sand and recycled mixed powders based on the dense packing theory [J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition),2023,51(2):243-249.