

不同长度钢纤维混掺对 UHPC 性能影响试验研究

Experimental Study on the Effect of Mixing Steel Fibers of Different Lengths on the Performance of UHPC

周志威, 王杰, 余中华, 刘佳欣, 肖东

(成都城投城建科技有限公司, 四川成都 610500)

摘要: 为有效降低超高性能混凝土 (UHPC) 中钢纤维的使用成本, 采用混掺不同长度钢纤维方式, 对 UHPC 的基本工作性能和力学性能进行对比研究。结果表明: 钢纤维长度对 UHPC 扩展度有一定影响, 总体上长纤维混掺组的扩展度小于短纤维混掺组, 钢纤维掺量比钢纤维长度对扩展度的影响更大; 热水养护可以促进 UHPC 中氢氧化钙迅速反应生成强度更高的 C-S-H 凝胶物质, 热水养护 3 d 的 UHPC 力学强度明显高于标准养护 28 d 的力学强度; 热水养护混掺 8、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压强度最高, 混掺 16、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗折强度最高, 标准养护混掺 16、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压和抗折强度最高; 通过层次分析法对 UHPC 综合性能进行计算分析, 发现在采用 13、20 mm 或者 16、20 mm 混掺方案时, 综合性能可以超过 13 mm 长钢纤维单掺 3% 的 UHPC 综合性能, 通过混掺优化可使 UHPC 材料生产成本降低 600~700 元/m³。

关键词: 超高性能混凝土; 钢纤维长度; 混掺; 层析分析法; 综合性能

中图分类号: U444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0030-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.007

ZHOU Zhiwei, WANG Jie, YU Zhonghua, LIU Jiaxin, XIAO Dong

(Chengdu Chengtou Urban Construction Technology Co., Ltd., Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to effectively reduce the cost of steel fibres in ultra-high performance concrete (UHPC), a comparative study of the basic working and mechanical properties of UHPC was carried out by mixing different lengths of steel fibres. The results show that: the length of steel fibre has a certain effect on the degree of expansion of UHPC, in general, the degree of expansion of the long fibre mixing group is smaller than that of the short fibre mixing group, and the amount of steel fibre mixing has a greater effect on the degree of expansion compared with the length of steel fibre; hot water curing can promote the rapid reaction of calcium hydroxide to generate a higher strength of the C-S-H gel substance in UHPC, and the mechanical strength of the UHPC in hot water curing for 3 d is significantly higher than that of the standard curing. The mechanical strength of UHPC in hot water conditioning for 3 d is significantly higher than that of standard conditioning for 28 d; the compressive strength of UHPC with 8 and 20 mm steel fibres in hot water conditioning is the highest, the flexural strength of UHPC with 16 and 20 mm steel fibres in hot water conditioning is the highest, and the compressive and flexural strengths of UHPC with 16 and 20 mm steel fibres in standard conditioning are the highest; the comprehensive performance of UHPC was calculated through the hierarchical analysis, and the calculation and analysis of UHPC performance were found to be the highest with the mixing scheme of 13 and 20 mm or 16 and 20 mm. It is found that the comprehensive performance of UHPC with 13 and 20 mm or 16 and 20 mm mixing

作者简介: 周志威 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 市政、水利、建筑材料相关研究工作。

通信作者: 王杰 (1990—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政、桥梁方面研究工作。

收稿日期: 2023-05-30

scheme can exceed the comprehensive performance of UHPC with 13 mm long steel fibre single mixing 3% , and the optimization of mixing can reduce the production cost of UHPC material by 600~700 RMB/m³.

Keywords: ultra high performance concrete; steel fiber length; mixing; chromatography analysis method; comprehensive performance

0 引言

超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, 简称 UHPC) 是一种具备超高强度、超高韧性和超高耐久性的新型建筑材料, 在桥梁工程、市政工程、建筑工程、军事工程等领域得到越来越广泛的关注和应用^[1-3]。研究表明; 掺入钢纤维可以使 UHPC 的延性和弯曲韧性得到显著增强^[4], 但是钢纤维掺量的增多也会导致其施工性能降低, 而且钢纤维价格较高, 增加钢纤维掺量势必会导致 UHPC 生产成本迅速升高, 钢纤维的大量使用也与国家“碳达峰、碳中和”的发展目标相悖^[5]。因此有必要对 UHPC 钢纤维的掺入方式展开研究, 以使 UHPC 在兼顾优良施工和力学性能前提下, 减少钢纤维的用量。

Yoo, Wu 等^[6-7]通过研究发现, UHPC 流动性随着钢纤维掺量的增加而逐渐降低, 但力学强度会逐渐增强; Yu 等^[8]通过实验发现 UHPC 的流动性和力学强度随钢纤维掺量增加呈先增后减的变化趋势, 这与 Yoo, Wu 等的研究结果有区别; 梁兴文等^[9]通过研究发现, UHPC 的抗压强度随着钢纤维增加而逐渐增大, 但抗折强度则随着钢纤维增加呈先增后减的变化特征, 这与 Yoo, Wu 和 Yu 的研究成果也存在较大区别; 朋改非等^[10]研究发现, 在同等钢纤维掺量下, 平直型钢纤维对 UHPC 的增强增韧效果要优于端钩型钢纤维; 聂洁等^[11]通过试验表明, 同型钢纤维混掺时, UHPC 的弯曲断裂性能要优于单掺试件, 但扩展度和抗压强度会略有降低, 混掺异型纤维时, 18 mm 平直型 + 16 mm 端钩型为最佳的混掺搭配形式, 且最佳混掺比例为 1:1。通过上述研究可以总结得出: 钢纤维的掺量、形状、尺寸对于 UHPC 的性能存在或多或少的影响, 但影响规律尚存在较大的分歧, 因而仍需通过大量试验来进行验证。

本文采用 40、65、80 和 100 四种不同长度平直型钢纤维进行两两混掺, 然后与常规单掺钢纤维试验组的工作性能和力学性能进行对比研究, 以期在

获得综合性能较优的 UHPC 钢纤维掺入方式下, 将 UHPC 中钢纤维单位体积用量由 3% 控制到 2%, 极大提升 UHPC 的工程经济效益。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥: 都江堰拉法基牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 平均比表面积 348 m²/kg, 标准稠度用水量 27.6%, 平均烧失量 3.85%, 初凝和终凝时间分别为 158 min 和 208 min, 3 d 抗折和抗压强度分别为 5.3 MPa 和 28.2 MPa。粉煤灰: 神华生产能源有限公司江油发电厂 F 类 I 级粉煤灰, 细度 (45 μm 方孔筛筛余) 8.4%, 需水量比 93%, 平均烧失量 2.22%, 平均密度 2.48 g/cm³, SO₃ 含量为 2.2%, f-CaO 含量为 0.14%, 氯离子含量为 0.013%。硅灰: 达斯特牌硅灰, SiO₂ 含量为 92.5%, 平均烧失量 2.8%, 平均含水率 1.3%, 蓄水量比为 114%。偏高岭土: 内蒙古超牌新材料股份有限公司生产, 白色粉末状, 7 d 和 28 d 活性指数分别为 117% 和 123%, 粒度 (2 μm) 含量 79.1%, 45 μm 筛余 0.02%, 平均含水率 0.22%, 主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃, 占比分别为 54.31% 和 44.23%。镀铜钢纤维: 重庆盛诺恒新材料科技有限公司生产, 金黄色, 平直型, 直径为 0.2 mm, 密度 7.8 g/cm³, 平均抗拉强度 2850 MPa。减水剂: 广东双塔新材料有限公司生产, 含固量为 40.2%, 密度 1.074 g/cm³, pH 值 3.7, 减水率 32%。细骨料: 英砂, 分为 630~830、212~630 和 125~187.5 μm 三个粒径范围。水为自来水。

1.2 试验设计

选取 8、13、16 和 20 mm 四个长度的钢纤维, 采用两两混掺方案, 即有 8、13、8、16、8、20、13、16、13、20 和 16、20 mm 六种混掺试验组, 体积掺量均为 1% + 1%。由于目前工程和试验中比较常用的 13 mm 长钢纤维, 因此为了验证混掺效果, 还另外设计了体积掺量为单掺 2% 和 3% 的 13 mm 长

材料科学

钢纤维试验组。所有试验组水胶比均为 0.168，减水剂掺量为 1.6%。具体试验配合比方案见表 1。

表 1 试验配合比设计方案
Table 1 Experimental mix design scheme

号	水泥	粉煤灰	硅灰	偏高岭土	钢纤维				减水剂	水	石英砂		
					8 mm	13 mm	16 mm	20 mm			630~830 μm	212~630 μm	125~187.5 μm
1	700	200	150	50	78.5	78.5			17.9	185	250	343.8	406.3
2	700	200	150	50	78.5		78.5		17.9	185	250	343.8	406.3
3	700	200	150	50	78.5			78.5	17.9	185	250	343.8	406.3
4	700	200	150	50		78.5	78.5		17.9	185	250	343.8	406.3
5	700	200	150	50		78.5		78.5	17.9	185	250	343.8	406.3
6	700	200	150	50			78.5	78.5	17.9	185	250	343.8	406.3
7	700	200	150	50		157			17.9	185	250	343.8	406.3
8	700	200	150	50		236			17.9	185	250	343.8	406.3

1.3 试件制备流程

按照试验配合比称取原材料，将水泥、粉煤灰、硅灰、偏高岭土和细骨料倒入搅拌机搅拌 2~3 min，制得干粉料；再向干粉料中倒入减水剂和水继续搅拌 5~8 min，待搅拌出浆液状态后，向搅拌机中均匀倒入钢纤维，然后继续搅拌 8~10 min；对搅拌好的浆液进行工作性能测试，将浆液倒入模具中（100 mm × 100 mm × 100 mm 抗压强度和 100 mm × 100 mm × 400 mm 抗折强度），然后放到振动台上振动 20~30 s，待 UHPC 完全凝固后（一般为 24 h），进行脱模，将试件分为两组、每组 3 块，分别进行热水养护（水温 80 ℃）和标准养护（温度 20 ℃，湿度 95%），热水养护时间为 3 d，标准养护时间为 28 d；待到指定龄期，分别进行抗压和抗折试验。

2 试验结果分析

2.1 工作性能影响分析

从图 1 中可知，在 8 组试验中，第 2 试验组（8、16 mm，掺量各为 1%）的扩展度最大，达到 685 mm，第 8 试验组（13 mm，掺量 3%）的扩展度

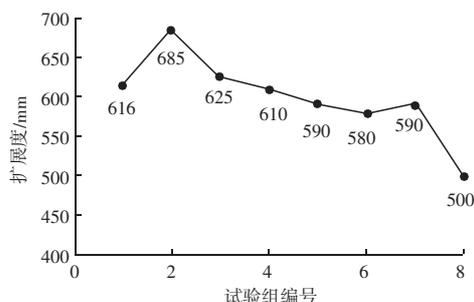


图 1 混掺不同长度钢纤维浆体流动性指标对比
Fig. 1 Comparison of the expansion degree of slurry mixed with different lengths of steel fibers

最小，仅为 500 mm，大部分试验组的扩展度介于 580~630 mm；从整体上来讲，纤维长度对 UHPC 流动性有一定的影响，随着纤维长度的增加，UHPC 流动性整体上呈降低的变化趋势，但降低幅度不是很明显，而且在某些混掺方式下，流动性反而会增大。这是因为钢纤维的长度增加，在同等体积掺量下，钢纤维数量减少，这有利于拌和及浆体的流动性，但是长纤维不易分散，往往更容易形成交织网状结构，这不利于浆体的流动性，因而才会呈现出流动性变化复杂的情况。掺入 3% 体积掺量钢纤维的 UHPC 相比掺入 2% 体积掺量的 UHPC，流动性有较大幅度降低，相比 2% 掺量时降低了 90 mm。由此可见，钢纤维掺量才是影响 UHPC 流动性的第一要素，钢纤维掺量越多，纤维与拌合物基体之间的黏结摩阻力越大，因而浆体的流动性降低。

2.2 抗压强度影响分析

从图 2 中可知，相同混掺方式下，采用热水养护 3 d 试件强度明显高于采用标准养护 28 d 试件强度。这是因为采用热水养护加速了 UHPC 基体中的水化反应速率，使得基体中氢氧化钙的含量迅速减小，生成强度更高的 C-S-H 凝胶物质，这些物质填充在基体空隙中，增强了水泥浆体与骨料、钢纤维之间的界面过渡区，可以大大提高基体的密实度，因而通过热水养护可以大幅度提升 UHPC 的早期强度。

在热水养护条件下，混掺 8、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压强度最高，达到 153 MPa，分别较单掺 2% 和单掺 3% 长 13 mm 钢纤维试验组的 UHPC 抗压强度提升了 5.4% 和 10.8%；在标准养护条件下，混掺 16、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压强度最高，达到 136.7 MPa，分别较单掺 2% 和 3% 钢纤维的 UHPC

抗压强度提升了 11.1% 和 21.8%。单掺 3% 钢纤维试验组的 UHPC 抗压强度反而低于单掺 2% 的试验组，这可能是因为在当钢纤维掺量增大后，钢纤维在基体中不易分散，会存在团聚现象，从而形成薄弱界面，因此抗压强度反而会降低，同时也说明采用合理钢纤维混掺方式对于 UHPC 抗压强度提升是有利的。

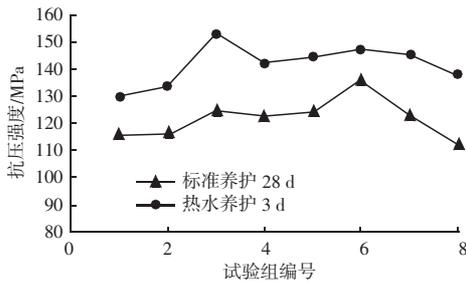


图 2 混掺不同长度钢纤维 UHPC 抗压强度对比
Fig. 2 Comparison of compressive strength of UHPC mixed with different lengths of steel fibers

2.3 抗折强度影响分析

由图 3 中可知，混掺不同长度钢纤维的 UHPC，除了试验 3 组（8、20 mm）外，采用热水养护的 UHPC 抗折强度均高于采用标准养护的 UHPC 抗折强度，这是因为在热水养护条件下，受界面增韧对钢纤维滑移的影响，纤维与基体之间的黏结强度得到显著增强，可以提高钢纤维在 UHPC 中的桥接作用，从而提高抗折强度；单掺 2% 钢纤维的 UHPC 蒸养抗折强度和标养抗折强度分别为 29 MPa 和 21.7 MPa，单掺 3% 钢纤维的 UHPC 蒸养抗折强度和标养抗折强度分别为 34.9 MPa 和 28.6 MPa，当钢纤维体积掺量由 2% 增加至 3% 后，热水养护的 UHPC 抗折强度提升了 20.3%，标准养护的提升了 31.8%，这说明单掺钢纤维，通过增加钢纤维掺量可以明显提高 UHPC 抗折强度的，钢纤维掺量越多，能够提供桥接作用的钢纤维越多，因而抗折强度越高；不管是采用热水养护，还是采用标准养护，试验 6 组（16、20 mm）的 UHPC 抗折强度为最大，分别达到 39.4 MPa 和 38.2 MPa，较单掺 2% 钢纤维时，分别提升了 35.9% 和 76%，较单掺 3% 钢纤维时，分别提升了 12.9% 和 33.6%，这说明长纤维对于 UHPC 抗折强度有明显的提升作用，当需要提高 UHPC 抗折强度时，除了考虑增加纤维掺量外，还可以考虑适当改变纤维长度来改变纤维与基体之间的摩阻力，从而减少钢纤维用量，提高 UHPC 的经济性。

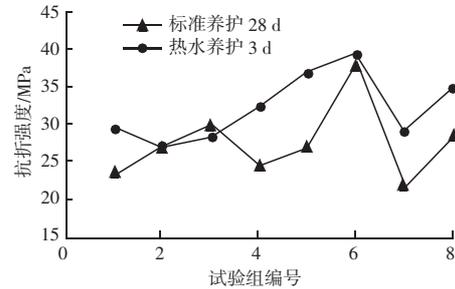


图 3 混掺不同长度钢纤维 UHPC 抗折强度对比
Fig. 3 Comparison of flexural strength of UHPC mixed with different lengths of steel fibers

3 基于 AHP 的钢纤维混掺方式优选

3.1 构造评价矩阵

选取不同长度钢纤维混掺模式下 UHPC 的扩展度、抗压强度和抗折强度 3 个指标作为 UHPC 配合比试验结果的评判因素，采用层次分析法（AHP）对各混掺方案进行综合评价。在 UHPC 预制构件时，往往对 UHPC 抗弯折强度（P1）的要求更高，其次为抗压强度（P2），再次为扩展度（P3）。根据文献 [12] 中的相关定义，分别选取 P1、P2、P3 的相对重要性尺度指标为 1、1.8 和 2.5，然后通过各指标两两比较，构建 UHPC 综合性能评价矩阵，见表 2。从表 2 中可以看到，通过指标评价矩阵，计算得到抗折、抗压强度和扩展度的权重系数分别为 0.507、0.307 和 0.186，评价矩阵的一致性比率 $CR = 0.00644 < 0.1$ ，表明评价指标权重计算合理。

表 2 评价矩阵

Table 2 Evaluation matrix

P	P1	P2	P3	权重
P1	1.0	1.8	2.5	0.507
P2	1/1.8	1.0	1.8	0.307
P3	0.4	1/1.8	1.0	0.186

3.2 综合性能评价

在保持 UHPC 工作性能和力学性能基本不变（甚至略有提高的前提下），通过混掺不同长度钢纤维方式将钢纤维体积用量由 3% 优化控制在 2%，因此，将单掺 3% 钢纤维试验组的指标作为基本对比指标，分别计算每种钢纤维混掺方式下的综合性能，结果见表 3。从表 3 中可知，在热水养护条件下，试验 4、5、6 组的综合性能均大于 1；在标准养护条件下，试验 2、3、5、6 组的综合性能均大于 1，即试验 5（13、20 mm）、6 组（16、20 mm）混掺方式

材料科学

下, UHPC 的综合性能优于单掺 3% 钢纤维情况, 不管是热水养护制度还是标准养护, 试验 6 组的综合性能评价结果均为最高, 分别达到 1.115 和 1.267。

表 3 综合性能计算结果

Table 3 Comprehensive performance calculation results

养护方式	试验组	P1	P2	P3	综合性能
热水养护	1	0.842	0.937	1.232	0.944
	2	0.774	0.968	1.370	0.944
	3	0.811	1.108	1.250	0.984
	4	0.931	1.029	1.220	1.015
	5	1.060	1.046	1.180	1.078
	6	1.129	1.064	1.160	1.115
	7	0.831	1.051	1.180	0.964
	8	1	1	1	1
标准养护	1	0.818	1.035	1.232	0.962
	2	0.944	1.034	1.370	1.051
	3	1.052	1.111	1.250	1.107
	4	0.857	1.092	1.220	0.996
	5	0.937	1.113	1.180	1.036
	6	1.336	1.218	1.160	1.267
	7	0.759	1.096	1.180	0.941
	8	1	1	1	1

3.3 钢纤维混掺方式优选

采用钢纤维混掺方式相较于单掺方式可以有效改善 UHPC 的工作性能和力学性能, 当混掺钢纤维长度较短时, UHPC 的流动性较好, 但力学性能较差; 当混掺钢纤维长度较长时, UHPC 流动性较差, 但力学性能较好。相比单掺 3% 长 13 mm 钢纤维试验组, 在热水养护和标准养护条件下, 混掺 13、20 mm 长钢纤维的 UHPC 较单掺 3% 试验组的综合性能分别提升了 7.8% 和 3.6%, 混掺 16、20 mm 长钢纤维 UHPC 则分别提升 11.5% 和 26.7%。由此可见, 为了降低 UHPC 单位体积钢纤维用量, 建议首选 16、20 mm 长钢纤维混掺, 其次为 13、20 mm 长钢纤维混掺, 混掺之后 UHPC 材料价格可降低 600 ~ 700 元/m³, 具有较高的工程经济效益。

4 结论

为有效降低 UHPC 材料生产成本, 采用混掺不同长度钢纤维方式, 对 UHPC 工作性能和力学性能进行了对比试验研究, 得出如下结论:

(1) 纤维长度对 UHPC 浆体流动性影响较小, 整体上随长度增加而减小, 钢纤维掺量是影响 UHPC 流动性的主要因素。

(2) 单掺 13 mm 长钢纤维, 采用热水养护 (3 d) 条件下的 UHPC 强度明显高于采用标准养护 (28 d) 条

件下的 UHPC 强度; 热水养护条件时, 混掺 8、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压强度最高, 混掺 16、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗折强度最高; 标准养护条件下, 混掺 16、20 mm 长钢纤维的 UHPC 抗压和抗折强度最高。

(3) 基于层次分析法, 对不同混掺方案下 UHPC 综合性能进行计算, 当采用 13、20 mm 或者 16、20 mm 长钢纤维混掺方案时, UHPC 在热水养护和标准养护下的综合性能均优于单掺 3% (13 mm) 组; 16、20 mm 长钢纤维的混掺效果尤为明显, 相比单掺 3% 试验组, 热水养护和标准养护下的综合性能分别提升了 11.5% 和 26.7%。

参 考 文 献

- [1] 曹君辉, 樊伟, 李立峰, 等. 基于 UHPC 的高性能桥梁结构研究与应用 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (11): 1-32.
- [2] 黄跃, 张美涵. UHPC 节段预制拼装桥梁断面设计及预应力体系研究 [J]. 公路, 2023, 68 (3): 190-195.
- [3] 张文华, 刘鹏宇, 吕毓静. 超高性能混凝土动态力学性能研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33 (19): 3257-3271.
- [4] 龚致远, 顾炳伟, 邹金丽, 等. 不同配合比下 UHPC 的早期性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (12): 27-30, 35.
- [5] 张伟宏. 碳排放挑战与中国建材行业的机遇 [J]. 混凝土世界, 2021, 148 (10): 30-37.
- [6] YOO D Y, SHIN H O, YANG J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced Concrete with micro steel fibers [J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 122133.
- [7] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 103, 8.
- [8] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultrahigh performance fibre reinforced concrete (UHPRC) [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 2939.
- [9] 梁兴文, 胡翱翔, 于婧, 等. 钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2018, 35 (3): 722-731.
- [10] 朋改非, 牛旭婧, 赵怡琳. 异形钢纤维对超高性能混凝土增强增韧的影响 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19 (6): 1013-1018.
- [11] 聂洁, 李传习, 钱国平, 等. 钢纤维形状与掺量对 UHPC 施工及力学特性的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35 (4): 4042-4052.
- [12] 陈亮, 杨立飞, 许为民, 等. 基于力学性能试验的 UHPC 钢纤维掺量优化与性价比分析 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (增刊 1): 18-25.