

钢纤维的掺量和长径比对超高性能混凝土施工和力学性能的影响

王欢^{1,2,3}, 罗鹏飞^{1,2,3}, 段昕智^{1,2,3}

(1. 上海市市政规划设计研究院有限公司, 上海市 200031; 2. 上海城投城市发展研究院有限公司, 上海市 200031;

3. 上海城市路域生态工程技术研究中心, 上海市 200031)

摘要: 研究了不同钢纤维掺量(1.5%~2.5%)及长径比(65、80、90)对超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)施工性能、力学性能的影响。通过开展扩展度试验、流动度试验、抗压强度试验和哑铃型试件的直接拉伸试验,系统分析了钢纤维不同参数搭配,对混凝土的施工性能和力学指标的作用规律。研究结果表明:随着钢纤维掺量的增加和长径比的增大,UHPC的扩展度和流动性逐渐降低;在一定范围内(掺量2.0%以上),抗压强度和抗拉性能显著提高,并表现出应变硬化行为,极限抗拉应变达到3 000 $\mu\epsilon$ 以上。结果可为钢纤维增强UHPC的配比设计提供参考。

关键词: 钢纤维;超高性能混凝土;扩展度;抗压强度;极限抗拉强度;应变硬化

中图分类号: TU5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0022-05

Influence of Steel Fiber Content and Aspect Ratio on Construction and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete

WANG Huan^{1,2,3}, LUO Pengfei^{1,2,3}, DUAN Xinzhi^{1,2,3}

(1. Shanghai Municipal Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200031, China; 2. Shanghai Urban Construction Investment

Urban Development Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200031, China; 3. Shanghai Urban Road Domain Ecological Engineering

Technology Research Center, Shanghai 200031, China)

Abstract: The influences of different steel fiber contents (1.5%~2.5%) and aspect ratios (65, 80 and 90) on the construction and mechanical properties of ultrahigh performance concrete (UHPC) are studied. By conducting scalability tests, fluidity tests, compressive strength tests and direct tensile tests on dumbbell-shaped specimens, the effect laws of different parameter combinations of steel fibers on the construction performance and mechanical indicators of concrete are systematically analyzed. The research result shows that as the steel fiber content and aspect ratio increase, the scalability and fluidity of UHPC are gradually decreasing. Within a certain range (above a content of 2.0%), the compressive strength and tensile properties significantly improve, exhibiting strain-hardening behavior with the ultimate tensile strain reaching over 3 000 $\mu\epsilon$. The results can provide a reference for the proportion design of steel fiber-reinforced UHPC.

Keywords: steel fiber; ultra-high performance concrete (UHPC); scalability; compressive strength; ultimate tensile strength; strain hardening

0 引言

超高性能混凝土是基于颗粒紧密堆积理论形成的具有超高强度和超强的耐久性的混凝土,已经成为了各工程领域的研究热点像桥梁、海洋、风电等领

域^[1-2]。从Larrard和Sedran在1994年提出的UHPC概念以来^[3],对其的应用研究在不断进步。但是UHPC本身有较高的脆性和较低的抗拉韧性,在要求有大变形或者是复杂应力的场景中,还是存在着问题^[4]。对于这些缺陷,后来的学者设想在基体中掺入钢纤维,有效地增加其韧性,在基体中通过桥接裂缝、传递应力,能显著提升UHPC的拉伸性能和拉伸应变^[5]。近些年,围绕钢纤维类型、掺量、长径比等参数对UHPC性能的影响开展了大量试验研究。杨文等^[6]通过调节钢纤维掺量进行单轴拉伸试验证实

收稿日期: 2026-03-11

基金项目: 上海城投集团科技创新计划项目(CYKY-CYHYD-2023-005)

作者简介: 王欢(1991—),男,本科,工程师,从事科研试验工作。

UHPC 的应力-应变行为,可以从应变软化向应变硬化进行转变,极限抗拉强度与极限拉伸应变均能得到提升。李传习等^[7]研究表明,随着纤维掺量增加或长径比提高,会降低 UHPC 的流动性,但同时也能提高抗压、抗折强度及弯曲韧性。金清平等^[8]在研究论述中指出相较于平直型纤维,异形纤维与基体的机械锚固力更强,增强韧性的效果更好,但对工作性能影响也很大,建议体积掺量控制在 2%~3%。彭佳琳等^[9]针对钢纤维的种类和混掺比例进行试验研究,进一步验证了端钩型纤维能提升力学性能,同时也发现平直型与端钩型纤维按照 1:1 比例混掺后产生正混杂效应。余睿等^[10]从微观角度研究钢纤维掺量过高会引起纤维 3D 网络的无序化和过度搭接,进而破坏基体紧密堆积结构。李芳园^[11]研究了钢纤维长径比、种类、混掺方式对 UHPC 轴拉性能的影响,研究表明纤维长径比增大后可提升峰值强度,但端钩型纤维再拉伸试验后期应力下降速率较快。宋锐涛等^[12]通过霍普金森杆冲击试验,探索钢纤维对 UHPC 动态力学性能的影响,结果发现,掺入钢纤维能有效提升 UHPC 的动态抗压和抗拉强度,但也会使其应变率敏感性降低。卢佳林等^[13]研究了钢纤维自密实混凝土的工作性与耐久性能,研究表明随着钢纤维掺量增加劈裂抗拉强度和轴向抗拉强度均得到显著提高,同时早期的抗裂性能也有明显改善。

综上,钢纤维掺量和长径比是 UHPC 整体性能的关键变量,二者通过影响纤维在基体中的分散、取向

及界面作用,对施工性能和力学性能产生复杂的影响。目前,关于二者协同作用机制,特别是对极限拉伸应变影响规律的研究仍有待深化。基于此,本文开展了一系列基于不同掺量与长径比的试验,通过扩展度测试、立方体抗压强度测试及直接拉伸试验,综合评估钢纤维参数对 UHPC 施工与力学性能的影响,旨在为 UHPC 的工程应用提供配比优化建议和理论参考。

1 试验概况

1.1 原材料

本研究所采用的胶凝材料包括台泥 P·O 52.5 等级普通硅酸盐水泥(比表面积为 375 m²/kg)、S95 级矿粉及硅灰(SiO₂含量大于 92%)。集料选用洁净石英砂,按粒径划分为粗砂和细砂两种,其中细砂最大粒径为 0.6 mm,粗砂最大粒径为 1.18 mm。外加剂采用高性能聚羧酸系减水剂,减水率大于 30%。钢纤维为镀铜直丝状钢纤维见图 1 和表 1。



图 1 钢纤维外观

表 1 钢纤维物理参数

编号	纤维类型	直径 d_f /mm	长度 l_f /mm	长径比(l_f/d_f)/mm	抗拉强度 / MPa
S13	平直(S)	0.20	13	65	≈ 2 800
S16	平直(S)	0.20	16	80	≈ 2 800
S18	平直(S)	0.20	18	90	≈ 2 800

1.2 试验方法

本研究主要评估不同钢纤维掺量与长径比对超高性能混凝土工作性及力学性能的影响。试验中,重点考察其对 UHPC 的扩展度、流动度、立方体抗压强度、极限抗拉强度、弹性段抗拉强度、极限抗拉强度与弹性段强度的比值以及极限拉伸应变等性能指标的影响规律。为确保钢纤维在 UHPC 基体中均匀分布,混合工艺采用以下步骤:将水泥、硅灰、矿粉、石英砂及外加剂进行干混,搅拌时间约为 1~2 min;加入预定质量比的水继续搅拌至浆体液化;液化完成后继续搅拌 1 min;最后分批缓慢加入钢纤维,初步搅拌 1 min 后再快速搅拌 2 min,确保纤维充分

分散且无结团现象。整个拌合过程应控制在 10 min 内完成,以确保拌合物性能稳定。各配合比中水灰比保持不变,为 0.17,水泥、硅灰、矿粉、细砂、粗砂料比例为 1:0.2:0.27:0.47:0.87,钢纤维类型和掺量见表 2,其中钢纤维的体积掺量基于混凝土总体积计算。

1.2.1 扩展度试验

搅拌结束后,进行扩展度试验、流动度试验。

试验依据《超高性能混凝土试验方法标准》(T/CECS 864—2021)^[14]、《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[15]执行。两项测试均用于评估不同钢纤维参数条件下 UHPC 拌合物的工作性

表 2 钢纤维类型和体积掺量表

配合比编号	钢纤维体积掺量/%	钢纤维类型
M-1	1.50	S13
M-2	1.75	S13
M-3	2.00	S13
M-4	2.25	S13
M-5	2.50	S13
M-6	1.50	S16
M-7	1.75	S16
M-8	2.00	S16
M-9	2.25	S16
M-10	2.50	S16
M-11	2.25	S18
M-12	2.50	S18

能。试验过程见图 2 和图 3。

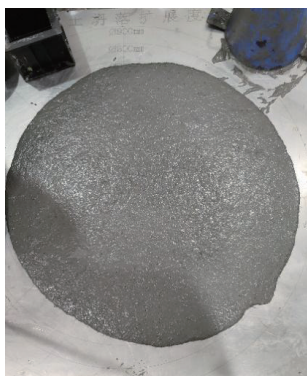


图 2 扩展度试验



图 3 流动度试验

1.2.2 立方体抗压强度试验

每个配合比制备 12 个立方体试块,边长为 100 mm。抗压强度试验采用万能试验压力机进行,最大承载能力为 3 000 kN,加载速率为 1 MPa/s(见图 4)。分别测试标准养护下的 1、3、28 d。

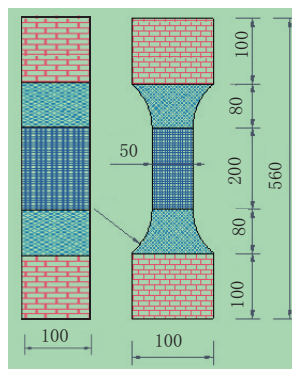
1.2.3 直接拉伸试验

直接拉伸试件,试件外观为哑铃形,截面积为 50 mm×100 mm,见图 5。拉伸过程中产生的裂缝,集中分布在长度为 200 mm 的标距范围内,有一条主裂缝。在试件两侧安装 2 个高精度位移计(liner variable differential transformer, LVDT),获得试件沿长度方向

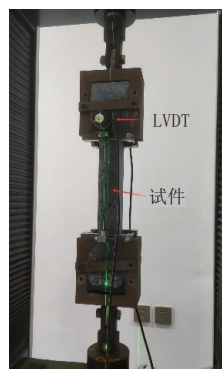


图 4 立方体抗压强度试验装置

的拉伸变形。



(a)(单位:mm)



(b)

图 5 拉伸试验

1.3 试验结果

1.3.1 扩展度和流动度试验结果

图 6 为钢纤维掺量对扩展度和流动度的影响趋势图,图 7 所示为展示了扩展度与流动度之间的对应关系。试验结果表明:扩展度随钢纤维掺量和长径比增加而降低:提升钢纤维体积掺量,扩展度逐渐减小。钢纤维具有较大的比表面积,会吸附更多水泥浆,同时其在浆体中形成三维骨架网络结构,显著增加内摩擦力和黏结阻力,降低流动性。当长径比达到 90 时,拌合物易发生纤维结团现象,这主要是因为长度增加后,“架桥”效应明显,阻碍自身和周围材料的流动,导致局部堆积钢纤维更容易相互缠绕,分散困难,需在搅拌过程中缓慢、分批加入钢纤维以确保其分散性。长径比对扩展度影响显著:钢纤维长度增加后,其在基体中形成更强的“桥接作用”,限制了浆体的自由扩展,从而进一步抑制了扩展度的增大。长径比越大,浆体流动越困难。扩展度与流动度存在良好的线型对应关系见图 7,说明扩展度可作为评估 UHPC 拌合物流动性能的有效指标。

1.3.2 立方体抗压强度试验结果

立方体抗压强度试验结果见图 8。研究结果表明:改变钢纤维在掺量对于混凝土本身早期强度影响不大,在 1 d 和 3 d 龄期,UHPC 的抗压强度主要由基体自身胶凝材料的水化程度决定,钢纤维尚未形成有效的增强结构,因此不同掺量和长径比条件下

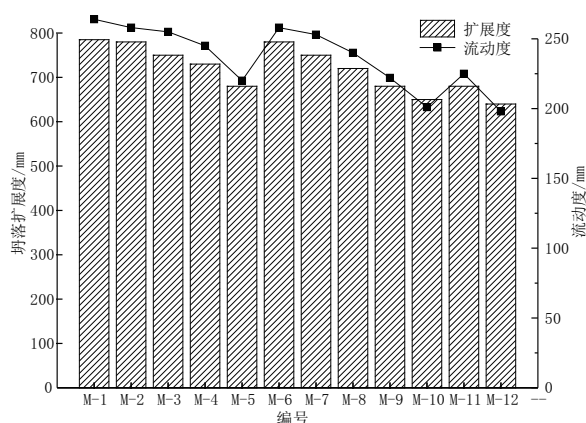


图6 钢纤维掺量和长径比对扩展度和流动度的影响

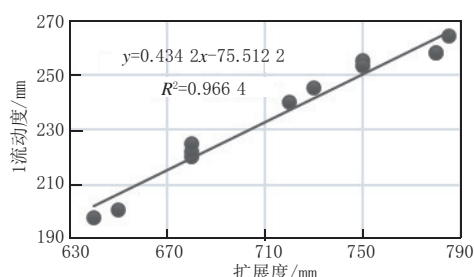


图7 扩展度和流动度的对应关系曲线

差异不明显。28 d抗压强度随钢纤维掺量增加而提升:当掺量由1.5%提升至2.5%时,28 d抗压强度由约123 MPa增加至150 MPa,提升幅度达22%。这一趋势表明,在后期强度发展阶段,钢纤维能够形成有效的增强网络,增强基体的抗裂能力,进而提高整体承载力。长径比影响相对温和但具有积极作用:虽然钢纤维长径比对早期强度影响不大,但随着长径比从65增至90,28 d抗压强度呈现出缓慢递增趋势。较长的纤维在基体中具有更好的桥接能力与黏结锚固效果,可有效抑制微裂缝扩展,增强结构韧性。

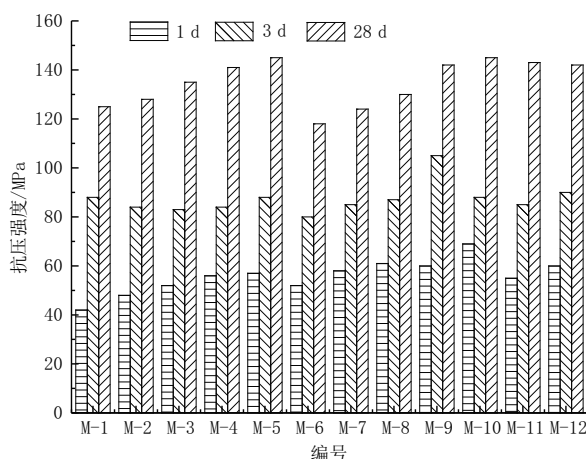


图8 钢纤维掺量和长径比对抗压强度的影响

1.3.3 直接拉伸性能试验结果

UHPC不同配合比的拉伸应力-应变关系见图

9。根据拉伸曲线形态的差异,可将其分为两类典型类型:应变软化型和应变硬化型。其中,M1、M6组试件表现为应变软化型曲线,即试件在达到峰值应力后迅速失稳破坏,延展性较差;M2、M3、M7、M8试件表现为低水平的应变硬化行为,峰值抗拉强度略高于弹性极限;而M4、M5、M9、M10、M11、M12组试件则明显呈现出应变硬化型行为,其极限拉伸应变普遍超过1 500 $\mu\epsilon$,峰值强度显著高于弹性强度,表明其裂后仍具有良好的承载能力和延展性能。弹性阶段抗拉强度随掺量增加而增长:在弹性阶段,抗拉强度主要由基体强度决定。随着钢纤维掺量增加,从M1到M12,弹性抗拉强度整体呈上升趋势,但在达到一定掺量(约2.25%)后增长趋缓,说明基体在纤维加入后的初期抗拉性能提升效果有限,逐渐趋于稳定。极限抗拉强度与应变显著受纤维掺量影响:随着掺量由1.5%提升至2.5%,峰值抗拉强度与极限拉伸应变同步增加。长径比对抗拉性能提升作用明显:在相同掺量下,长径比越高的配合比(如M10~M12),其极限抗拉强度、极限应变均更高,极限应变可达到3 000 $\mu\epsilon$ 以上。主要源于长纤维能增大的与基体产生黏结锚固力,有助于裂缝扩展后的持载能力,增强其延性。桥接机制的增强贡献:钢纤维在UHPC中呈随机分布,其与基体的界面黏结力形成锚固作用。在裂缝产生后,钢纤维可跨越裂缝实现拉力传递,形成裂后桥接网络。纤维掺量和长径比的增加均有助于提高该桥接效应,是实现应变硬化行为的关键因素。

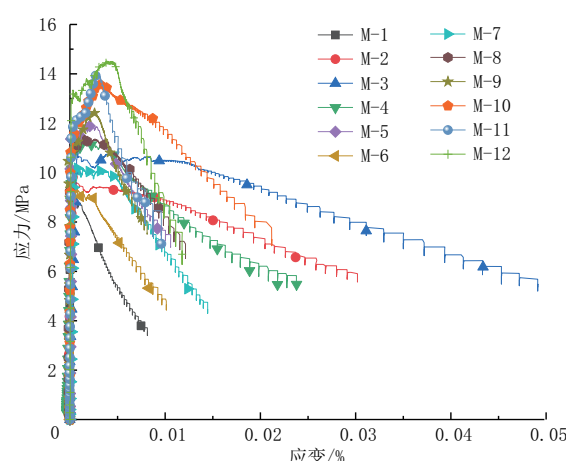


图9 拉伸曲线

2 结论

本研究围绕钢纤维掺量与长径比两个变量,通过开展扩展度试验、立方体抗压强度试验、哑铃形试件的拉伸试验,系统地探讨了其对超高性能混凝土

(UHPC)施工性能和力学性能的影响,得出以下主要结论。

(1)在施工性能方面,钢纤维掺量和长径比越大,UHPC扩展度和流动性越差。当掺量超过2.25%或长径比达到90时,易出现结团现象,不利于施工。当掺量控制在2.0%以内、长径比80以下可兼顾施工性和增强效果。

(2)在抗压性能方面,钢纤维对早期抗压强度影响不大,但在28 d龄期具有增强作用。当掺量为2.5%时抗压强度较1.5%提升约22%,长径比的增加亦有小幅促进作用。

(3)在抗拉性能方面,钢纤维对抗拉强度和应变提升明显。当掺量超过2.0%、长径比达到80以上时,试件普遍表现出应变硬化行为,极限应变可超3 000 $\mu\epsilon$ 。

(4)综上,建议钢纤维掺量控制在2.0%~2.25%、长径比约为80,以实现施工性能与力学性能的良好平衡。

参考文献:

- [1] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [2] 陈宝春,韦建刚,苏家成,等.超高性能混凝土应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):10-20.
- [3] 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.
- [4] Xu L H, Wu F H, Chi Y, et al. Effects of coarse aggregate and steel fibre contents on mechanical properties of high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 97-110.
- [5] 刘加平,汤金辉,韩方玉.现代混凝土增韧防裂原理及应用[J].土木工程学报,2021,54(10):47-54.
- [6] 杨文,谢昱昊,毕耀,等.钢纤维掺量及种类对超高性能混凝土拉伸应力应变的影响[J].混凝土,2022(5):37-42.
- [7] 李传习,石家宽,聂洁,等.平直型钢纤维掺量与长径比对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(9):2947-2954.
- [8] 金清平,陈川,黄桥连,等.超高性能混凝土中纤维作用效应研究综述[J].水利与建筑工程学报,2024,22(2):55-65.
- [9] 彭佳琳,黄智德,姚帅,等.钢纤维的形状和掺量对超高性能混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2025(7):48-53.
- [10] 余睿,范定强,孙美娟,等.钢纤维掺量及其3D空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2021,49(11):2313-2321.
- [11] 李芳园.钢纤维特性对UHPC抗拉性能的影响研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [12] 宋锐涛.钢纤维种类和掺量对超高性能混凝土动态力学性能的影响研究[D].长沙:中南大学,2023.
- [13] 卢佳林,牛子东,蓝国平,等.钢纤维自密实混凝土的工作性、力学及耐久性能研究[J].混凝土与水泥制品,2024(1):56-59.
- [14] T/CECS 864—2021 超高性能混凝土试验方法标准[S].
- [15] GB/T 2419—2005 水泥胶砂流动度测定方法[S].
- [10] 李江云,张选庆,胡子欣.城市雨水深隧系统多目标优化设计及运行[J].中国给水排水,2024,40(9):129-136.
- [11] 李鹏程.接入点设置对深层调蓄管道系统提标功能实现的影响因素初探[J].城市道桥与防洪,2017(9):98-100;12-13.
- [12] 李鹏程,徐文征.机器学习在多目标复杂排水系统中辅助运行控制的研究[J].给水排水,2021,47(8):154-159.
- [13] 李鹏程.深隧二三级管道入流方式及管径大小与瞬变流灾害的关系研究[J].水利规划与设计,2022(10):97-101;110.
- [14] Li P C, Zhou S H, Cao J, et al. Study on auxiliary operation control of machine learning in multiobjective complex drainage system[J]. Water Science and Technology 2022, 85(8): 2277-2294.
- [15] 高祯,李丹,杨园晶,等.城市排水深隧工程沉积物淤积特性研究[J].泥沙研究,2025(5):58-65.
- [16] 张剑,曹岳,王维康,等.深圳市南山一前海深层排水隧道工程通风除臭系统技术要点总结[J].给水排水,2024,60(增刊1):412-418.
- [17] 周获莎,冯艳,许听雨,等.深隧输水管道水力过渡过程敏感性分析及参数优化初探[J].水电能源科学,2024,42(12):106-110.
- [18] 周大庆,陈雅楠,陈会向,等.基于VOF模型的深隧系统入流竖井两相流模拟[J].中国给水排水,2023,39(19):132-138.
- [19] 李尔,曾祥英,邹惠君,等.基于数值模拟的武汉大东湖深隧入流竖井选型[J].中国给水排水,2023,39(15):108-114.
- [20] 杨园晶,黄鸽,马小蕾,等.前海—南山排水深隧排涝泵站规模研究[J].给水排水,2023,59(3):33-38.

(上接第15页)