

钢纤维与细非金属纤维混杂UHPC双向板 弯曲特性

于跟社¹, 邓宗才²

(1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:为研究混杂纤维对UHPC弯曲性能的影响, 本文将钢纤维与3种新型非金属细纤维混杂, 通过7组四边简支方板中心点加载试验, 研究了各组试件的受力过程、破坏形态和荷载-挠度曲线, 分析了混杂纤维UHPC板的初裂荷载、峰值荷载和弯曲韧性等。结果表明: 混杂纤维提高了UHPC板的初裂荷载、峰值荷载、能量吸收值和变形性能; 混杂纤维UHPC板的能量吸收值高于单掺1.3%钢纤维(SF); 混杂纤维UHPC板的峰后韧性指标 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 和 $T_{19}(10.5)$ 均高于单掺1.3%SF和1.8%SF试件, 混杂纤维显著提高了残余承载力和变形能力; 当SF分别与聚乙烯醇纤维(PVA)、玻璃纤维(GF)和玄武岩纤维(BF)混杂, SF/PVA、SF/BF的混杂增韧效应优于SF/GF。通过能量法、硬化指数和峰后韧性指标可以全面评价混杂纤维UHPC板在不同受力阶段的增强与增韧效应。

关键词:结构工程; 超高性能混凝土; 混杂纤维; 弯曲韧性; 能量吸收; 韧性指标; 硬化指数; 双向板

中图分类号: TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3265-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230009

Bending behaviors of two-way slab of UHPC with steel fiber and micro-nonmetallic fiber

YU Gen-she¹, DENG Zong-cai²

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the influence of hybrid fibers on the flexural properties of UHPC, steel fibers were mixed with three new types of micro-nonmetallic fiber. Through the center point loading test of seven groups of four-sided simply supported two-way slabs, the loading process, failure modes and load-deflection curves of each group were studied, and the initial crack load, peak load and bending toughness of hybrid fiber boards were analyzed. The results show that hybrid fibers can improve the initial crack load, peak load, energy absorption value and deformation performance of UHPC slabs. The energy absorption value of hybrid fiber board is higher than that of steel fiber (SF) doped 1.3%. The post-peak toughness indexes $T_9(5.5)$ and $T_{14}(8)$, $T_{19}(10.5)$ of hybrid fiber UHPC slabs were higher than those of single-doped with 1.3%SF and 1.8%SF specimens, and hybrid fiber improved the residual bearing capacity and

收稿日期: 2022-12-20.

基金项目: 北京市教委科技重点项目(KZ201810005008).

作者简介: 于跟社(1972-), 男, 教授级工程师. 研究方向: 道路工程及新型建筑材料. E-mail: yuer19213@163.com

通信作者: 邓宗才(1961-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 纤维混凝土. E-mail: dengzc@bjut.edu.cn

deformation capacity. When SF is mixed with polyvinyl alcohol fiber (PVA), glass fiber (GF) and basalt fiber (BF), the hybrid toughening effect of SF/PVA and SF/BF is better than SF/GF. Through energy absorption method, hardening index and post-peak toughness index, the strengthening and toughening effects of hybrid fiber UHPC slabs at different loading stages can be evaluated comprehensively.

Key words: structural engineering; ultra-high performance concrete; hybrid fiber; flexural toughness; energy absorption; toughness index; hardening index; two-way slab

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)是一种新型的水泥基复合材料,以其优异的力学性能、良好的工作性能和优异的耐久性能而使其在桥梁工程、装配式建筑、军事防护工程和核反应堆安全壳等领域具有广阔的应用前景^[1]。但超高强混凝土破坏时呈现明显的脆性破坏特征,为改善其变形能力在UHPC中掺入一定体积的钢纤维^[2]。钢纤维在UHPC破坏过程中发挥桥联和阻止裂缝扩展的作用,显著提升了基体开裂后的变形能力。目前随着纤维工业的发展,各种新型的纤维逐渐应用于改善混凝土的韧性、冲击性能和抗疲劳等^[3-5]。

混凝土中常用纤维种类,按材质可以划分为金属纤维(钢纤维、铝纤维、钛纤维以及合金纤维等)、无机非金属纤维(玻璃纤维、玄武岩纤维等)和有机纤维(聚乙烯醇纤维、聚丙烯纤维、聚乙烯纤维等)三大类,其中对同种类纤维中又有不同长度与直径之分,非金属纤维直径小于0.1 mm时称为细纤维^[6]。由于不同种类纤维力学性能及表面特征的不同、不同尺度纤维在水泥基复合材料的不同受力阶段和不同结构层次发挥的作用不同,混杂纤维可以实现逐级阻裂和协同增韧效用,最终实现增强和增韧效果^[7]。文献[8,9]研究表明:钢纤维、无机纤维的种类、掺量和长径比等会影响纤维对混凝土的增强与增韧效果;大尺度纤维可有效阻止宏观裂缝的扩展和提高峰后变形能力。UHPC不仅要具备高的强度,还要具有良好的韧性,因此将不同种类或不同尺度纤维进行混杂添加是提升UHPC综合性能的理想方法。Bakhshi等^[10]通过研究纤维水泥复合材料早期拉弯应变软化的表征,表明纤维的存在显著提高了材料的延性;Chun等^[11]研究了混杂粗、细钢纤维UHPC的拉伸性能,结果表明:钢纤维总掺量不变时,随细钢纤维掺量的增加,UHPC拉伸强度和对应能量吸收值均呈现增大趋势;Wu等^[12]研究表明在钢纤维总掺量为2.0%时,1.5%的长纤

维和0.5%的短纤维混杂时UHPC可获得最好的静态抗压性能。体积率2%的长钢纤维对静载抗压和弯曲强度的增强作用大于2%的短纤维。Kang等^[13]研究了钢纤维与微细非金属纤维混杂对UHPC抗压强度、密度和拉伸性能的影响规律,使用直径为0.2 mm的钢纤维与玄武岩纤维、PVA纤维和聚乙烯纤维(PE)混杂。结果表明:钢纤维与玄武岩纤维的混杂可提高UHPC抗拉强度。同时,文献[14]表明,钢纤维和无机非金属纤维混杂可以提高UHPC的早期韧性。

本文以钢纤维为主要纤维,细的合成纤维或者无机纤维为辅助纤维,通过纤维混杂使用,以达到优势互补,降低UHPC脆性和成本的目的。考虑到在不显著增加UHPC成本的前提下,用体积掺量为1.3%钢纤维与体积率0.5%的PVA纤维混杂、或者钢纤维分别与体积率0.5%的玻璃纤维(GF)、玄武岩纤维(BF)混杂使用。由于双向板在荷载作用下,微裂缝和宏观裂缝发展比较充分,能够更充分地反映纤维的桥联和阻裂作用,比梁试件更适合评价纤维对混凝土的增强与增韧效果,因此通过混杂纤维UHPC方形双向板弯曲试验,研究混杂纤维品种和尺度对板力学性能的影响规律及其混杂效应,为甄选纤维品种、确定纤维尺度等提供参考。

1 试验介绍

1.1 试验设计

试验以不同混杂纤维种类为变量,设计7个尺寸为500 mm×500 mm×50 mm的UHPC试件,其中混杂纤维UHPC方板试件5个,对照组中单掺钢纤维方板试件2个。混杂纤维试件中钢纤维体积掺量为1.3%,非金属纤维体积掺率均为0.5%,PVA纤维和BF纤维各有1种尺度、GF纤维有3种尺度。2个单掺钢纤维试件中钢纤维掺率分别为1.3%和1.8%。方板试件中纤维品种、掺率和几何尺寸等参数如表1所示。试件编号第1个S为双向板,S1.3代表钢纤维掺率1.3%,PVA0.5-

表 1 UHPC 试件参数表

Table 1 Parameters of UHPC specimen

序号	试件编号	纤维类型及掺量	
		钢纤维/%	合成/无机非金属纤维
1	S-S1.3PVA0.5-12	1.3	0.5%(PVA-12-0.04)
2	S-S1.3G0.5-6	1.3	0.5%(GF-6-0.014)
3	S-S1.3G0.5-12	1.3	0.5%(GF-12-0.014)
4	S-S1.3G0.5-18	1.3	0.5%(GF-18-0.014)
5	S-S1.3B0.5-12	1.3	0.5%(BF-12-0.02)
6	S-S1.3	1.3	—
7	S-S1.8	1.8	—

注:合成/无机非金属纤维命名方式,纤维种类+纤维长度+纤维直径,例如 PVA-8-0.04 代表聚乙烯醇纤维,纤维长度为 8 mm、直径为 0.04 mm。G 为玻璃纤维,B 为玄武岩纤维。

12 代表 PVA 的体积率 0.5%、纤维长度 12 mm。

表 2 UHPC 配合比 (1 m³)

Table 2 Mix proportion of UHPC (1 m³)

水胶比	砂胶比	胶凝材料用量/kg		河砂/kg	减水剂/kg	消泡剂/kg	用水量/kg		
0.18	1.2	水泥	矿物掺合料	10~20	20~40	40~80	11	2	182
		556	455	485	388	340			

UHPC 用钢纤维为镀铜精细钢纤维,其参数如表 3 所示。

表 3 钢纤维参数

Table 3 Parameter of steel fiber

项目	参数
型号	CW01-0.2/13
类别	镀铜、无端钩
长度/mm	13
直径/mm	0.2
长径比	65
抗拉强度/MPa	2 850

合成纤维或无机非金属纤维的物理力学性能和几何参数如表 4 所示,各纤维应力-应变关系如图 1 所示,试验所用纤维照片如图 2 所示。

1.3 试件制备

UHPC 采用强制式搅拌机进行搅拌,以特制木模具为方板成型模具。UHPC 成型工序:胶凝

每种配合比浇筑 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件 3 个,用以测定 UHPC 的立方体抗压强度。立方体与方板试件均在标准养护条件下养护 28 d,开始试验。

1.2 试验材料

UHPC 基体的配合比如表 2 所示。胶凝材料主要由水泥和复合矿物掺合料组成,水泥为 P. O52.5 普通硅酸盐水泥,复合矿物掺合料由比表面积为 16 000 m²/kg 的微硅粉和比表面积 450 m²/kg 的 95 级矿粉按一定比例掺和而成。细骨料采用目数为 10~20、20~40 和 40~80 的河砂。UHPC 制备中掺加减水剂和消泡剂,其中减水剂为高效聚羧酸 PC180,减水率不小于 30%,消泡剂为 P841。UHPC 拌合用水为普通自来水。

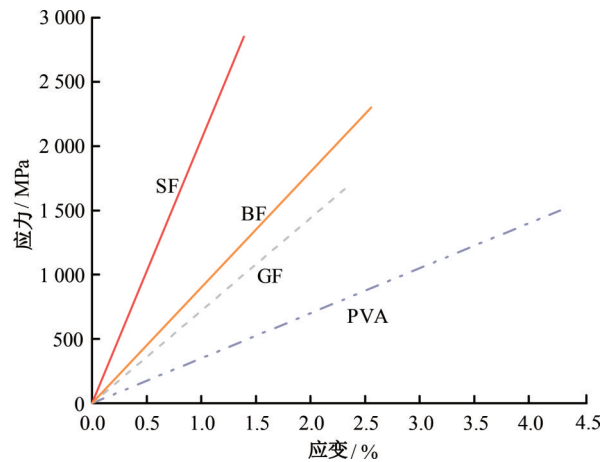


图 1 SF、PVA、GF 和 BF 应力-应变关系

Fig. 1 Stress-strain diagram for SF, PVA, GF and BF 材料+河砂搅拌 2~3 min,随后将混有减水剂和消泡剂溶液体积的 2/3 加入拌合物中进行搅拌。待 UHPC 搅拌均匀时人工将纤维缓慢加入拌合

表 4 合成纤维与无机非金属纤维参数

Table 4 Parameter of synthetic fiber and inorganic nonmetal fiber in test

纤维种类	长度/mm	直径/mm	弹性模量/GPa	强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	类别
PVA-12-0.04	12	0.040	40	>1 600	1 640	有机
GF-6-0.014	6	0.014	72	1 700	2 680	无机
GF-12-0.014	12	0.014	72	1 700	2 680	无机
GF-18-0.014	18	0.014	72	1 700	2 680	无机
BF-12-0.02	12	0.020	90	2 300	2 650	无机

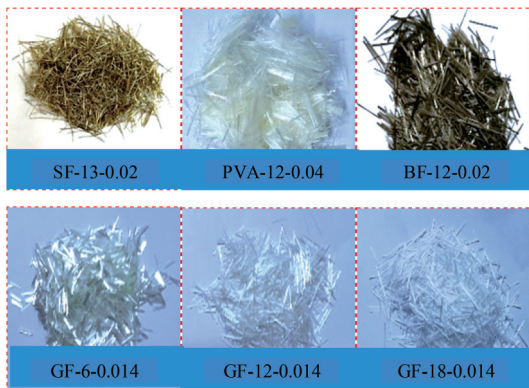


图 2 试验所用纤维

Fig. 2 Fibers in test

物中,搅拌 2~3 min,随后将剩余 1/3 溶液加入拌合物中,继续搅拌 4~5 min。随后将 UHPC 浇筑至木模中并在振动台上适量振捣。待浇筑成型 24 h 后将试件模板拆除,并移至温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 以上的标准养护室进行养护,28 d 后取出试件进行试验。

1.4 试验加载与测量方案

方板试验采用美国 MTS 电液伺服试验机中心点集中加载,板四边简支。其中以特制钢框为试件四边简支支座,板顶面中心点以特制钢块作为试件上加载点,如图 3 所示。在正式加载前进

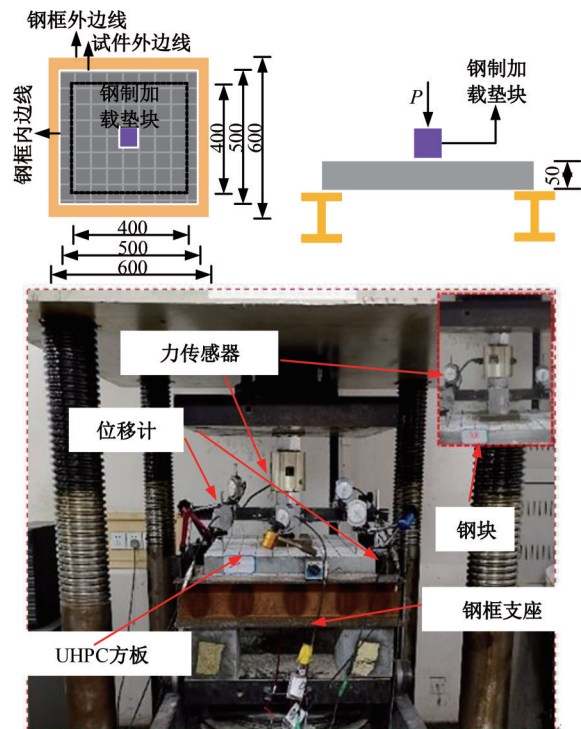


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

行预加载,预加荷载大小取预估破坏荷载的 15%,正式加载采用等速位移控制,速率为 1.5 mm/min。当加载至方板中心点挠度为 2.5、5、10、15 mm 时分别保载 5~10 min,以保证在此级荷载作用下试件裂缝得到充分发展,保载后详细记录裂缝发展情况。待试件中心点挠度超过 15 mm 后,根据荷载-中心点挠度曲线、裂缝开展宽度和荷载下降值等综合判断是否停止试验。

2 试验结果及分析

2.1 UHPC 抗压强度

按《混凝土物理力学性能测试方法标准》GB-T 50081-2019 进行立方体抗压强度测试,各组 UHPC 立方体抗压强度结果均值如表 5 所示。

由表 5 得到,单掺钢纤维掺率为 1.3% 的 UHPC 抗压强度为 118.3 MPa,而钢纤维混杂其他细合成纤维/无机纤维后,抗压强度增加不明显。与单掺 1.3% SF 比较,SF 与长度为 6 mm、直径为 0.014 mm 的 GF 混杂时,抗压强度提高了 7.9%,高于钢纤维与 PVA 或者 BF 纤维混杂试件,说明钢纤维与 GF-6-0.014 纤维混杂对改善 UHPC 抗压强度效果较明显。

表 5 纤维增强 UHPC 立方体抗压强度平均值

Table 5 Average cube compressive strength of UHPC with fibers

序号	试件编号	抗压强度/MPa
1	S-S1.3PVA0.5-12	113.2
2	S-S1.3G0.5-6	127.7
3	S-S1.3G0.5-12	114.8
4	S-S1.3G0.5-18	110.0
5	S-S1.3B0.5-12	116.5
6	S-S1.3	118.3
7	S-S1.8	121.1

2.2 试验现象与破坏形态

通过板试件加载破坏过程可知,试件 S-S1.3PVA0.5-12a 基本上发生弯曲破坏,局部出现冲切特征,中心处伴随一条长度 36~39 mm 的冲切裂缝,其余试件均为弯曲破坏。分析原因是 PVA 抵抗局部冲切破坏的能力不如弹性模量相对较高的玻璃纤维、玄武岩纤维。总的来说,纤维增强 UHPC 方板受弯呈现较好的延性破坏特征,7 组试件破坏形态如图 4 所示。

试件的破坏过程为:试验加载初期,荷载-挠度曲线呈现斜直线的形式,方板试件底面无可见

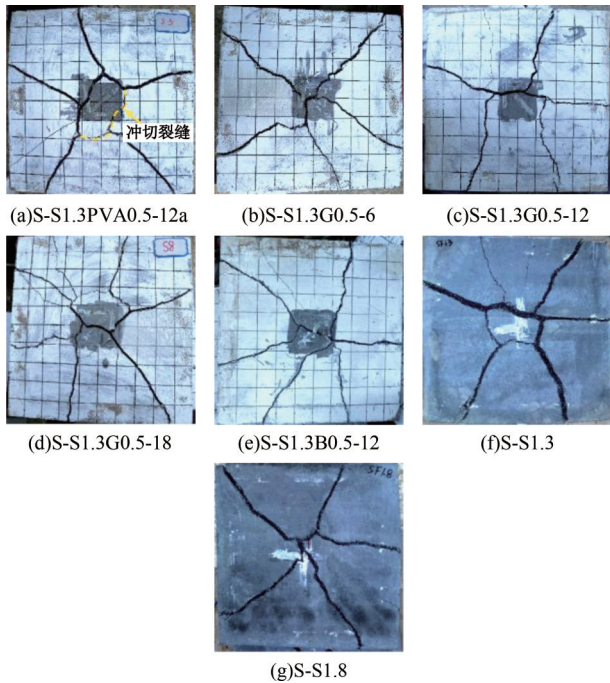


图 4 方板试件最终破坏形态

Fig. 4 Ultimate failure mode of square plate specimen

裂纹,加载过程中可间断听到“吡吡”的纤维滑移声,此时试件基本处于弹性工作状态。随着荷载的持续增大,荷载-挠度曲线出现“拐点”或“突变点”,荷载-挠度曲线上荷载出现小幅度下降后继续上升或荷载-挠度曲线斜率出现明显的降低。此时方板试件底部萌生数条微细裂纹,代表试件达到初裂点。

随着加载的继续,混杂纤维方板试件底面裂缝宽度增大,并向支座处延伸,同时在初始裂缝间隙之间萌生许多新的微细裂纹,裂缝宽度扩展过程中可明显听到“吡吡”的纤维滑移声和“噌噌”的纤维拔出声,此时试件进入弹塑性阶段,主裂缝逐渐扩展,中心点挠度增大明显,方板四边支座处呈现明显上翘。整个方板试件板底出现 5~6 条主裂缝,板被分割成 6~7 个区域。最后试件进入破坏阶段,裂缝长度和宽度逐渐延伸和扩展,并在截面高度上向上延伸,试件抗弯刚度降低明显,裂缝下方散落 UHPC 碎渣。

单掺钢纤维试件最终破坏时仅有数条主裂缝,几乎没有其他微细裂缝,而混杂纤维试件在主裂缝周边呈现多条次生裂缝。

2.3 荷载-挠度曲线

试验测得的各试件的荷载-挠度全曲线如图 5 所示,看出:

(1)荷载-挠度曲线的前期上升段,各曲线较

为接近,近似直线,但是不同组试件由直线变为曲线的拐点高低不同,表明不同混杂纤维对 UHPC 板初裂荷载的提高幅度不同。混杂纤维 UHPC 试件,荷载-挠度曲线的线弹性阶段过后曲线表现出一定的硬化现象,即荷载仍然上升,说明混杂纤维增强了 UHPC 的持荷能力和变形能力。

(2)各混杂纤维 UHPC 试件的荷载-挠度曲线均在单掺钢纤维试件 S-S1.3 的上方,但低于 S-S1.8 试件,即体积率 1.8% 钢纤维的掺入,可明显提升 UHPC 板的承载力。但试件 S-S1.8 荷载-挠度曲线达到峰值后荷载下降速率明显快于混杂纤维 UHPC 试件,且并无明显硬化现象。表明:当掺率大于 1.3% 后,再增加 SF 掺率对改善 UHPC 峰后持荷能力的作用不明显。

(3)比较各混杂试件的混杂效应,依据荷载-挠度曲线的高低判断混杂增强效应表现为:SF/BF < SF/GF < SF/PVA,对 3 种 GF 纤维而言, SF/GF-6-0.014 > SF/GF-18-0.014 > SF/GF-12-0.014。

(4)对比各组试件荷载-挠度曲线的下降段,各混杂纤维 UHPC 板下降段平缓, SF 纤维掺率一定时, PVA、GF 和 BF 纤维的掺入对提升 UHPC 峰后持荷能力和变形能力的作用明显。

以试件 S-S1.3PVA0.5-12 为例,分析 UHPC 方板荷载-挠度曲线的特征点。结合方板的裂缝萌生、发展全过程和破坏模式,可以将试件荷载-挠度曲线分为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段等 3 个阶段,全过程如图 6 所示。

第 I 阶段——弹性 OA 段:弹性阶段混凝土

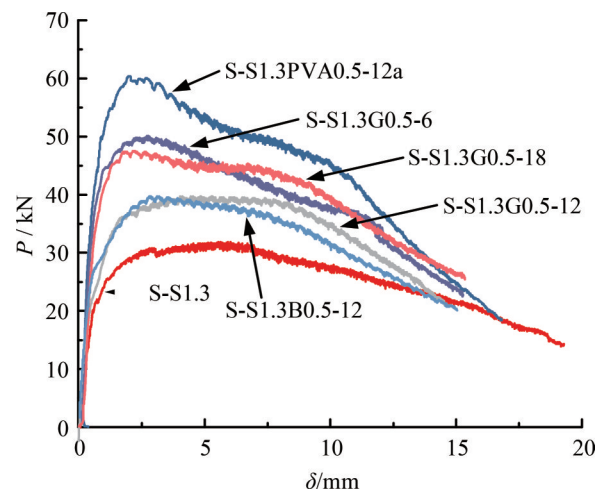


图 5 UHPC 试件荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load deflection curve of UHPC specimen

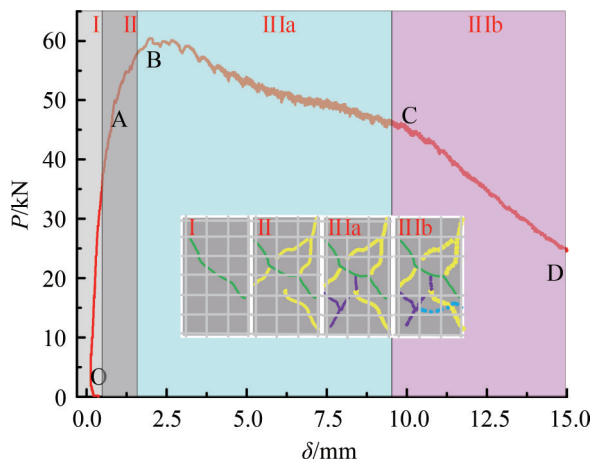


图6 典型UHPC试件3阶段荷载-挠度曲线

Fig. 6 Three stage load-deflection curve of typical UHPC specimen

材料初始裂缝的出现主要源自试件内部原始缺陷、微细裂纹的发展和连通,但由于随机分布的混杂纤维的存在,延缓了板初始裂缝的萌生,对UHPC板初裂荷载有一定的提高作用,初裂荷载可达到峰值荷载的60%~80%。

第II阶段——弹塑性强化阶段AB:荷载-挠度曲线过A点后,表现出较为明显的非线性特征,荷载增加变形也缓慢增加,板底面可见较为明显的微细裂纹。随荷载的持续增大,方板试件底面微裂缝数量逐渐增多,同时裂缝宽度不断扩展,但由于试件中混杂纤维阻裂作用,荷载并未呈现下降而是呈现持续上升的趋势。同时由于纤维呈现随机分布的形式,试件底部裂缝分布和发展较为曲折。此阶段主要表现出微裂缝的萌生和扩展,微裂缝间隙钢纤维和其他纤维共同阻滞微裂缝的扩展,但由于钢纤维的弹性模量较高,对微裂缝扩展的阻滞作用更为明显。此阶段仍有新的微细裂缝的出现,细的非金属纤维对裂缝扩展起到良好的阻滞作用。当荷载-挠度曲线到达B点后,

试件底部由1条或2条微裂缝发展为宏观主裂缝,且可间断听到“吡吡”的纤维与基体的滑移声。

第IIIa阶段——软化阶段BC:荷载-挠度曲线的BC段主要表现为主裂缝的扩展,此阶段钢纤维和其他纤维在主裂缝处起到桥联作用,主裂缝的扩展需要克服裂缝间隙中部分纤维的拔出和拉断所需消耗的能量。由于钢纤维和高模量玻璃纤维或者玄武岩纤维的存在,荷载下降非常平缓,具有良好的持荷能力。

第IIIb阶段——破坏阶段CD:当荷载-挠度曲线达到C点后,由于试件底面形成数条主裂缝,整个试件被数条主裂缝分割成数个大小不同的区域,各区域间主要由主裂缝处的纤维相连,方板试件有效截面高度减小,承载力明显下降。此时主裂缝已扩展到一定程度,细的非金属纤维的桥联作用较小,但主裂缝间隙中的钢纤维仍可发挥桥联作用。试验过程中可听到“噌噌”的纤维拔出声,荷载下降速率和中心点挠度增长速率同时加快,最终试件由于主裂缝扩展到一定程度而破坏。

2.4 初裂点与峰值点

荷载-挠度曲线中,视直线的终点为初裂点,以最高点作为峰值荷载点,统计出各组试件的初裂荷载和峰值荷载,如表6所示。

据图6和表6对比分析各组试件的初裂荷载和峰值荷载。各混杂纤维方板试件的初裂荷载和峰值荷载均高于单掺1.3%SF的试件。与单掺1.3%SF试件比较,混杂纤维SF/PVA-12-0.04板的初裂荷载和峰值荷载分别提高94.1%和90.3%;混杂纤维SF/GF-6-0.014板的初裂荷载和峰值荷载分别提高73.1%和55.7%;混杂纤维SF/GF-18-0.014板的初裂荷载和峰值荷载分别提高67.1%和48.4%;混杂纤维SF/BF-12-0.02板的初裂荷载和峰值荷载分别提高67.1%和48.4%。

表6 初裂、峰值荷载及其对应挠度

Table 6 Initial crack load, peak load and corresponding deflection

试件编号	初裂荷载 P_{cr} /kN	峰值荷载 P_u /kN	初裂挠度 δ_{cr} /mm	峰值挠度 δ_u /mm
S-S1.3PVA0.5-12	49.7	60.5	0.91	1.45
S-S1.3G0.5-6	44.3	49.5	0.99	2.72
S-S1.3G0.5-12	34.1	38.9	1.41	4.46
S-S1.3G0.5-18	42.8	47.2	1.16	2.27
S-S1.3B0.5-12	26.7	39.1	0.58	2.53
S-S1.3	25.6	31.8	1.21	5.61
S-S1.8	65.6	84.6	2.22	3.36

2.5 弯曲韧性

采用能量法和裂后弯曲韧性指标法可以全面评价混杂纤维 UHPC 板的弯曲韧性。对强化段采用硬化指数以表征开裂后承载力继续上升的特征,用裂后弯曲韧性指标法表征裂后混杂纤维对提高 UHPC 板残余承载力和变形能力的贡献。

2.5.1 能量-挠度曲线

各试件的能量-挠度曲线如图 7 所示,为比较不同混杂纤维对 UHPC 板弯曲韧性的贡献,计算了不同挠度下($\delta=2.5、5.0、7.5、10、12.5$ mm)的能量吸收值,即 $W_{2.5}、W_{5.0}、W_{7.5}、W_{10}、W_{12.5}$,同时软化阶段不同挠度时的荷载值如表 7 所示。

由表 7 看出,与单掺 1.3%SF 相比,各混杂纤维试件的能量吸收值均有明显提高。混杂纤维 SF/PVA、SF/GF 试件的能量吸收值高于混杂纤维 SF/BF。以 $W_{12.5}$ 为例,与试件 S-S1.3 相比,试件 S-S1.3PVA0.5-12、S-S1.3G0.5-6、S-S1.3G0.5-12、S-S1.3G0.5-18、S-S1.3B0.5-12 的 $W_{12.5}$ 依次提高 66.68%、48.69%、18.24%、48.29% 和 21.41%。所有混杂纤维 UHPC 板的

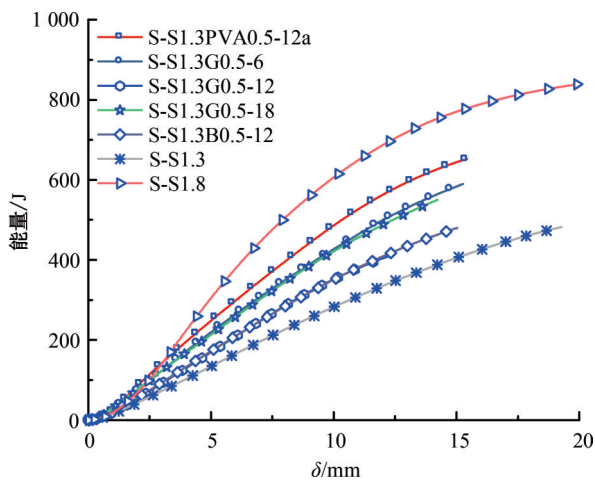


图 7 UHPC 试件能量-挠度曲线

Fig. 7 Energy-deflection curve of UHPC specimen

表 7 不同挠度能量吸收值及残余承载力

Table 7 Energy absorption values and corresponding loads in different deflection

试件编号	不同挠度对应能量吸收值/J					不同挠度残余承载力/kN			
	$W_{2.5}$	$W_{5.0}$	$W_{7.5}$	W_{10}	$W_{12.5}$	$P_{5.0}$	$P_{7.5}$	P_{10}	$P_{12.5}$
S-S1.3PVA0.5-12a	114.4	248.2	371.6	487.3	579.2	52.3	48.9	43.9	33.4
S-S1.3G0.5-6	98.8	219.4	328.5	427.3	516.7	44.8	40.3	36.2	27.7
S-S1.3G0.5-12	72.3	169.4	266.7	352.5	410.9	38.9	38.1	29.6	21.2
S-S1.3G0.5-18	99.5	212.7	322.5	430.3	515.3	44.3	43.2	39.4	29.7
S-S1.3B0.5-12	74.6	171.8	265.5	351.5	421.9	37.9	36.6	31.4	27.1
S-S1.3	74.2	134.5	210.5	282.5	347.5	26.3	25.1	22.8	19.8
S-S1.8	102.2	304.9	475.8	609.7	703.5	77.2	59.7	45.7	32.7

耗能能力均提高,体现了不同种类纤维之间的正混杂效应。具有较高的弹性模量和抗拉强度的微细纤维,有助于延缓微裂纹的产生与扩展,多裂缝的开裂特征,提高了 UHPC 板的耗能能力。

非金属纤维中,PVA 纤维对 UHPC 板耗能贡献最大,GF 次之,BF 最小。原因是 PVA 纤维与基体黏结性能优越。3 种尺度 GF 中,长度为 6 mm 和 18 mm 的 GF 对 UHPC 板耗能贡献优于长度为 12 mm。其主要原因是长度为 6 mm 的 GF 纤维单位体积内包含的纤维数量更多,对 UHPC 内部微裂缝的改善作用更明显;长度为 18 mm 的 GF 纤维,对 UHPC 裂后宏观裂缝的桥接控制能力更显著。

与试件 S-S1.3 相比,挠度值为 5、7.5 mm 时,混杂纤维试件能量吸收值的提高比例分别为 25.9%~84.5% 和 26.1%~76.5%。

与试件 S-S1.3 相比,当挠度值分别为 10、12.5 mm 时,混杂纤维试件的能量吸收值提高比例分别为 24.4%~72.5% 和 18.2%~66.7%。

2.5.2 分阶段韧性评价方法

混杂纤维增强 UHPC 板具有多裂缝扩展和显著的应变硬化特征,即板开裂后承载力仍继续增大;峰值荷载后混杂纤维增强 UHPC 板具有良好的变形能力。因此,为了更全面地评估混杂纤维对 UHPC 板的增强和增韧效果,采用下面分段评估的方法。

(1) 硬化指数 I_{sh}

用应变硬化指数 I_{sh} (Strain hardening index) 来表征 UHPC 板从初裂到达峰值荷载阶段承载力继续增加的硬化特征,其增强效应的计算式为:

$$I_{sh} = \frac{P_u}{P_{cr}} \quad (1)$$

式中: P_{cr} 为初裂点对应荷载; P_u 为峰值点对应荷载。

硬化指数计算结果如表 8 所示,可见,SF 与 BF 混杂、SF 与 PVA 混杂,对 UHPC 板初裂后承载力的强化作用明显。GF 纤维的长度为 12 mm 时,增强作用优于长度分别为 6 mm 和 18 mm。

(2) 裂后韧性指标

根据纤维对构件裂后耗能能力的贡献,Nemkumar 等^[15]提出了基于能量比值的裂后韧性指标评价方法,能科学地表征纤维对板试件裂后韧性的提升作用。由于强度比值法不适合于板试件^[16],裂后韧性指标定义为:给定挠度 $n\delta_{p,cr}$ 下纤维的韧性贡献 $\Delta E_{n\delta_{p,cr}} = E_{n\delta_{p,cr}} - E_{\delta_{p,cr}}$,其中 $\delta_{p,cr}$ 为板初裂时的挠度值, $E_{n\delta_{p,cr}}$ 为挠度 $n\delta_{p,cr}$ 时所对应的荷载-挠度曲线下的面积; $E_{\delta_{p,cr}}$ 为初裂挠度对应曲线下的面积。则给定挠度 $n\delta_{p,cr}$ 时的弯曲韧性指标 $T_{2(n-1)}(n)$ 为:

$$T_{2(n-1)}(n) = \frac{\Delta E_{n\delta_{p,cr}}}{E_{\delta_{p,cr}}} = \frac{E_{n\delta_{p,cr}} - E_{\delta_{p,cr}}}{E_{\delta_{p,cr}}} \quad (2)$$

按照裂后弯曲韧性指标的计算方法,据各组试件荷载-挠度曲线,分别取 $n=3, 5.5, 8$ 和 10.5 计算各组试件裂后韧性指标 $T_4(3)$ 、 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 、 $T_{19}(10.5)$,计算结果如表 8 所示,同时列出理想弹塑性材料的韧性指标,便于将混杂纤维 UHPC 的韧性指标与理想弹塑性材料进行对比。

硬化指数和裂后韧性指标方法的优点:可全面评价 UHPC 板峰前应变硬化特征和裂后的弯曲韧性;采用承载力硬化指数和基于能量比值的

韧性指标法,具有无量纲形式,不受试件尺寸和加载方式的影响;物理意义明确, I_{sh} 越大,应变硬化越显著;韧性指标越大,混杂纤维对 UHPC 板开裂后增韧效果越好。

由表 8 各试件裂后韧性指标看出:裂后早期阶段的 $T_4(3)$,试件 S13PVA0.5-12 和 S1.3B0.5-12 表现出较高的裂后韧性指标 $T_4(3)$,说明 SF/PVA 纤维混杂和 SF/BF 纤维混杂对 UHPC 裂后早期阶段弯曲韧性的提升较为明显。

裂后中、后期韧性指标 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 和 $T_{19}(10.5)$,试件 S-S1.8 明显低于其他组试件,说明钢纤维掺率达到一定值时,提高掺率对 UHPC 后期韧性的提升作用不明显;混杂纤维增强 UHPC 板的 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 和 $T_{19}(10.5)$ 明显高于单掺 1.3%SF 和 1.8%SF 板,即在下降段中、后期混杂纤维 UHPC 的韧性指数明显高于单掺钢纤维试件;混杂纤维试件的 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 和 $T_{19}(10.5)$,试件 S1.3B0.5-12 高于 S1.3PVA0.5-12,说明混杂纤维 SF/BF 较 SF/PVA 对提升 UHPC 板裂后中、后期韧性有利;对 UHPC 板裂后中、后期韧性的提升作用,SF 与 3 种不同尺度 GF 纤维的混杂中,长度为 6 mm 和 18 mm 稍优于长度为 12 mm。其原因是长度为 6 mm 的 GF 纤维单位体积内单丝纤维数量较多,对 UHPC 内部微裂缝的阻滞作用明显;长度为 18 mm 的 GF 纤维,对 UHPC 裂后宏观裂缝的桥接控制能力更为显著,裂缝扩展到一定宽度时仍能发挥桥联作用。

表 8 硬化指数和裂后韧性指标值

Table 8 Strain hardening index and post fracture toughness index

试件编号	I_{sh}	裂后韧性指标			
		$T_4(3)$	$T_9(5.5)$	$T_{14}(8)$	$T_{19}(10.5)$
S-S1.3PVA0.5-12	1.22	3.9	8.8	13.2	17.2
S-S1.3G0.5-6	1.12	3.6	7.9	11.9	15.5
S-S1.3G0.5-12	1.14	3.3	7.5	11.4	15.6
S-S1.3G0.5-18	1.10	3.6	8.0	12.2	15.8
S-S1.3B0.5-12	1.46	3.7	9.4	15.2	20.9
S-S1.3	1.24	3.3	7.7	11.8	15.5
S-S1.8	1.29	4.2	7.5	9.0	9.5
理想弹塑性材料	1.0	4	9	14	19

3 结 论

(1) 混杂纤维改善了 UHPC 板的受弯破坏形态,UHPC 方板受弯破坏过程可分为弹性阶段、

弹塑性强化阶段(微裂缝萌生与扩展)和主裂缝扩展的软化阶段。

(2) 混杂纤维的掺入可提高方板 UHPC 试件的初裂荷载和峰值荷载,但当纤维总量一定时,钢

纤维对峰值荷载的提高较合成纤维或无机非金属纤维更显著。

(3)与单掺 1.3%SF 相比,各混杂纤维试件的能量吸收值均有明显提高。混杂纤维 SF/PVA、SF/GF 试件的能量吸收值高于 SF/BF。

(4)混杂纤维增强 UHPC 板的裂后韧性指标 $T_9(5.5)$ 、 $T_{14}(8)$ 和 $T_{19}(10.5)$ 均高于单掺 1.3%SF 和 1.8%SF 试件,混杂纤维具有良好的阻裂增韧作用,提高了裂后承载力和变形能力。SF/PVA 混杂和 SF/BF 混杂对 UHPC 裂后弯曲韧性的提升较为明显。

(5)提出了基于承载力提升的硬化指数和基于能量吸收的韧性指标评价方法,可全面评价混杂纤维不同阶段的增强与增韧贡献,用硬化指数可表征峰前应变硬化效应,用韧性指数可表征混杂纤维对板裂后阶段的增韧贡献。

参考文献:

- [1] 史金华, 史才军, 欧阳雪, 等. 超高性能混凝土受压弹性模量研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3067-3075.
Shi Jin-hua, Shi Cai-jun, Ouyang Xue, et al. Compressive elastic modulus of ultra-high performance concrete: a review[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3067-3075.
- [2] 苏家战, 林毅竣, 陈宝春, 等. 混杂钢纤维 UHPC 单轴拉伸性能的混杂效应分析[J]. 南昌大学学报: 自然科学版, 2019, 41(4): 358-364.
Su Jia-zhan, Lin Yi-jun, Chen Bao-chun, et al. Hybrid effects of steel fibers on the uniaxial tensile properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2019, 41(4): 358-364.
- [3] 陈宝春, 林毅竣, 杨简, 等. 超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2020, 48(1): 58-68.
Chen Bao-chun, Lin Yi-jun, Yang Jian, et al. Review on fiber function in ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 58-68.
- [4] Cengiz O, Turanlı L. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8):1357-1364.
- [5] Bindiganavile V, Banthia N. Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(6): 503-514.
- [6] 朱如如. 混杂纤维对活性粉末混凝土性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2016.
Zhu Ru-ru. Research on the effects of hybrid fiber on reactive powder concrete[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2016.
- [7] 李黎, 曹明莉, 冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的纤维混杂效应研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(4): 843-853.
Li Li, Cao Ming-li, Feng Jia-qi. Research progress on fiber hybrid effect in fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(4): 843-853.
- [8] Galobardes I, Silva C L, Figueiredo A, et al. Alternative quality control of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC)[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 1008-1015.
- [9] Banthia N, Gupta R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices[J]. Materials and Structures, 2004, 37: 707-716.
- [10] Bakhshi M, Barsby C, Mobasher B. Comparative evaluation of early age toughness parameters in fiber reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 2014, 47(5): 853-872.
- [11] Chun B, Yoo D. Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete[J]. Composites Part B-Engineering, 2019, 162: 344-360.
- [12] Wu Z M, Shi C J, He W, et al. Uniaxial compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28: 0601601712.
- [13] Kang S T, Choi J I, Koh K T, et al. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Composite Structures, 2016, 145: 37-42.
- [14] 沈荣熹, 王璋水, 崔玉忠. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [15] Nemkumar B, Trottier J F. Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition[J]. ACI Materials Journal, 2018, 92(1): 48-57.
- [16] 邓宗才, 曲玖玲, 刘国平. 粗聚烯烃纤维混凝土圆板弯曲韧性和表征方法[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 7-11.
Deng Zong-cai, Qu Jiu-ling, Liu Guo-ping. Flexural toughness and its characterization of a new kind of macro-polyolefin fiber reinforced concrete plate[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 7-11.