

共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验

王春生 张洋 段兰

Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material doped with copolymer formaldehyde fiber

WANG Chunsheng, ZHANG Yang, DUAN Lan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维/水泥复合材料徐变性能试验

Experimental study on creep performance of polyvinyl alcohol fiber/engineered cementitious composite with different fiber contents

复合材料学报. 2020, 37(1): 205–213 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190425.002>

不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维增强工程水泥复合材料梁剪切韧性试验

Experimental study on shear toughness of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composite beams with different fiber contents

复合材料学报. 2019, 36(8): 1968–1976 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.006>

全玻璃纤维增强树脂筋混凝土电缆排管的抗弯试验

Experimental study on flexural performance of concrete cable duct reinforced with glass fiber reinforced polymer bars

复合材料学报. 2018, 35(1): 70–80 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170322.001>

钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响

Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2018, 35(3): 722–731 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170612.005>

纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响

Influence of fiber volume fraction on dynamic compressive properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites

复合材料学报. 2021, 38(9): 3094–3108 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201204.001>

纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.003

共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料 抗弯性能试验



分享本文

王春生*, 张洋, 段兰

(长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘要: 为探究共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料(UHPFRC)的抗弯力学性能,设计并测试了5组抗弯试件,包括3组纤维单掺型试件和2组纤维混杂型试件。结果表明:共聚甲醛纤维UHPFRC试件中,纤维体积掺量为2vol%时,UHPFRC试件具有更好的抗弯强度,平均强度可达13.4 MPa;适量的共聚甲醛纤维可延缓UHPFRC基体的开裂,增强其裂前变形能力,5组试件中,2vol%共聚甲醛纤维UHPFRC试件的开裂挠度最大,可达0.65 mm;混杂纤维可更好地增强UHPFRC的抗弯强度和韧性,1.5vol%共聚甲醛纤维和1.5vol%钢纤维混掺时,UHPFRC试件抗弯强度可达13.9 MPa,同时该组试件的韧性最好。本文揭示了共聚甲醛纤维在UHPFRC抗弯力学性能方面的作用效果,对其在UHPFRC中的应用及UHPFRC的推广具有重要参考价值。

关键词: 共聚甲醛纤维;超高性能水泥基复合材料;抗弯性能;纤维类型;纤维掺量

中图分类号: TU528; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)01-0373-10

Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material doped with copolymer formaldehyde fiber

WANG Chunsheng*, ZHANG Yang, DUAN Lan

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to investigate the flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material (UHPFRC) doped with copolymer formaldehyde fiber, five groups of bending specimens were designed and tested, including three groups of single mixed specimens and two groups of fiber hybrid specimens. The results show that among the copolymer formaldehyde fiber UHPFRC specimens, 2vol% copolymer formaldehyde fiber UHPFRC specimens have better flexural strength, with an average strength of 13.4 MPa. An appropriate amount of co-formaldehyde fiber can delay the cracking of UHPFRC matrix and enhance its ability to deformation before cracking. Among the five groups of test pieces, the cracking deflection of 2vol% copolymer formaldehyde fiber UHPFRC test piece is the largest, which can reach 0.65 mm. Hybrid fiber can better enhance the flexural strength and toughness of UHPFRC. When 1.5vol% copolymer formaldehyde fiber and 1.5vol% steel fiber are mixed, the flexural strength of UHPFRC specimens can reach 13.9 MPa, and the toughness of this group of specimens is the best. The research reveals the effect of copolymer formaldehyde fiber on the flexural mechanical properties of UHPFRC, which has important reference value for its application in UHPFRC and the promotion of UHPFRC.

Keywords: copolymer formaldehyde fiber; ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material; flexural performance; fiber type; fiber content

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-02; 录用日期: 2023-04-22; 网络首发时间: 2023-05-25 13:48:47

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230524.003>

基金项目: 钢桥疲劳损伤的冷维护方法及长期性能研究(51578073); 长寿命高性能钢桥智能设计、建造与管养创新团队(2019TD-022)

Research on Cold Maintenance Methods and Long Term Performance of Steel Bridge Fatigue Damage (51578073); Long Life High Performance Steel Bridge Intelligent Design, Construction, and Management Innovation Team (2019TD-022)

通信作者: 王春生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为钢桥与组合结构桥梁, 桥梁疲劳断裂与长寿命高性能桥梁 E-mail: wcs2000wcs@163.com

引用格式: 王春生, 张洋, 段兰. 共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 373-382.

WANG Chunsheng, ZHANG Yang, DUAN Lan. Flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composite material doped with copolymer formaldehyde fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1): 373-382(in Chinese).

水泥基材料是土木工程结构广泛采用的主体建筑材料,随着工程需求的变化,材料性能不断提升,经历了普通混凝土、高性能混凝土(HPC)、纤维增强混凝土(FRC)、超高性能混凝土(UHPC)、超高性能水泥基复合材料(UHPFRC)等材料的发展。其中,UHPFRC通过在基体中加入纤维来获得更高的弯拉、韧性、抗渗、耐久等性能,可解决混凝土应用于大跨径桥梁时由于弯拉强度较差而导致的开裂、疲劳等问题,已成为工程材料发展的重要方向。应用于UHPFRC中的纤维从材质方面可分为金属纤维(主要指钢纤维)、有机合成纤维(主要有聚乙烯醇纤维、聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚甲醛纤维等)、无机合成纤维(主要有玻璃纤维、玄武岩纤维、碳纤维等)^[1-2]。其中钢纤维由于优异的抗拉性能和较佳的综合性能,在UHPFRC中的应用早期便得到了重点研究^[3]。

与钢纤维相比,有机纤维弹性模量较低、经济效益显著^[2]、耐腐蚀,用于水泥基复合材料可抑制裂缝的产生和发展,并具有较强的持荷能力,适用于较恶劣的服役条件。王义超等^[4]对聚乙烯纤维制备的超高延性水泥基复合材料进行了研究,结果表明聚乙烯纤维有较好的裂缝桥接能力,可大大增强水泥基复合材料的延性。黄政宇等^[5]研究了聚乙烯纤维对超高性能混凝土性能的影响,试验结果表明:聚乙烯纤维能够显著提高混凝土的抗折强度、抗压强度、韧性,聚乙烯纤维掺量为2vol%时效果最好。赖建中等^[6]通过试验研究发现,聚乙烯醇纤维可改善高温下超高性能混凝土的抗爆裂性能。陈倩等^[7]对聚丙烯纤维和钢纤维混杂时超高性能混凝土的强度进行了研究,结果表明:混杂纤维可增强超高性能混凝土的立方体和轴心抗压强度,混杂纤维最佳配比为1.5vol%钢纤维和0.1vol%共聚甲醛纤维。滕晓丹等^[8]通过试验研究发现,钢纤维和聚乙烯纤维结合的混杂纤维可显著提高混凝土的抗压强度,同时,温度对混凝土的抗压强度影响较大,温度越高,抗压强度越低。晏麓晖等^[9]研究了超高分子量聚乙烯纤维混凝土的基本力学性能,试验表明:超高分

子量聚乙烯纤维可明显提升混凝土的抗拉强度、抗折强度,但对混凝土的抗压强度增强效果不明显。从以上研究可以看出,新型高性能有机纤维大大促进了水泥基复合材料的发展,不断探索高性能有机纤维UHPFRC有着重要意义。

共聚甲醛纤维是聚甲醛纤维的一种,具备耐酸碱腐蚀、低引气等优点,应用于水泥基材料时,纤维分散均匀、不易结团、与基体结合紧密^[10-12]。安宇坤等^[10]发现长度为15 mm、掺量低于0.25vol%的聚甲醛纤维对混凝土的抗渗性能和抗收缩性有显著增强效果。吕锦飞^[11]对聚甲醛纤维混凝土的力学性能进行了研究,发现聚甲醛纤维可显著增强混凝土的抗劈拉及抗折性能,对抗压性能的影响较小。何越骁等^[12]通过高温循环试验研究发现:高温下共聚甲醛纤维UHPC抗爆裂性能好,但也会失去增韧作用,单掺时使用温度应不大于165℃;共聚甲醛纤维与钢纤维混合使用时,共聚甲醛纤维长度为8 mm时效果最好,在防止高温爆裂的同时还可保证高温后残余力学性能较好。

基于此,本文选取了共聚甲醛纤维和钢纤维作为UHPFRC的掺入纤维,参照瑞士SIA2052规范^[13]和法国设计规程^[14]等对UHPFRC试件进行三点弯曲试验。使用数字图像测量技术(DIC)捕捉试件的位移和应变的变化过程^[15-16],分析共聚甲醛纤维对UHPFRC的抗弯强度和弯曲韧性的影响。

1 试验概况

1.1 原材料

UHPFRC的原材料包括:P-O42.5普通硅酸盐水泥;河砂,粒径 $d < 0.5$ mm;硅灰,粒径范围0.1~0.15 μm ;减水剂,包括A、B两种组分,减水剂A组分是型号为Sika visocrete的液态减水剂,减水剂B组分是固态Sika微珠粉;钢纤维(SF),圆直型镀铜钢纤维,江西赣州大业;共聚甲醛纤维(POM),重庆云天化天聚新材料有限公司。钢纤维和共聚甲醛纤维的几何与物理参数如表1所示。

1.2 配合比及试件制备

设计了5组UHPFRC抗弯试件,尺寸均为

表1 纤维的几何与物理参数

Table 1 Geometrical and physical properties of fibers

Fiber type	Density/(g·cm ⁻³)	Diameter/mm	Length/mm	Elastic modulus/GPa	Tensile stress/MPa	Elongation/%
POM	1.40	0.2	12	≥10	≥1 000	≤16
SF	7.85	0.2	13	20-25	2 850	3.5-4

Notes: POM—Copolymer formaldehyde fiber; SF—Steel fiber.

50 mm×100 mm×500 mm, 其中两组试件的纤维类型为共聚甲醛纤维; 一组试件的纤维类型是钢纤维; 其他两组纤维类型是包括共聚甲醛纤维和钢纤维的混杂纤维; 试验分组如表2所示, 1%POM-1%SF/C组 UHPFRC 抗弯试件制作1个, 其他每组 UHPFRC 抗弯试件制作3个, 通过计算平均值来分析共聚甲醛纤维 UHPFRC 的弯曲性能。

试件制备时, 原材料的投放顺序对 UHPFRC 的性能有一定影响^[7], 根据前期试拌经验确定了 UHPFRC 的制备过程。其制备过程为: 先将水泥、

河砂、硅灰、微珠粉等干料进行混合搅拌, 此过程持续3 min左右; 加入共聚甲醛纤维继续搅拌, 此过程持续5~8 min; 搅拌均匀后依次加入1/2水、1/2减水剂、1/2水、1/2减水剂, 水与减水剂加入时间间隔1 min, 此过程持续5 min; 最后加入钢纤维继续搅拌, 此过程持续4~6 min。搅拌均匀后进行试件浇筑, 浇筑时从模具一侧向另一侧匀速倒入。随后, 在试件表面覆盖塑料薄膜, 防止水分损失或蒸发, 试件于48 h后脱模, 采用覆盖湿棉被养护, 根据试验设计要求, 养护28天。

表2 试件分组

Table 2 Specimen grouping

Group	POM content/vol%	SF content/vol%	Cement/(kg·m ⁻³)	Silica fume/(kg·m ⁻³)	Sand/(kg·m ⁻³)	Sika viscocrete/(kg·m ⁻³)	Beads powder/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)
2%POM-0%SF/C	2	0	904.8	67.9	1 258.8	36.8	171.7	165
3%POM-0%SF/C	3	0	904.8	67.9	1 258.8	36.8	171.7	165
0%POM-3%SF/C	0	3	904.8	67.9	1 258.8	36.8	171.7	165
1%POM-1%SF/C	1	1	904.8	67.9	1 258.8	36.8	171.7	165
1.5%POM-1.5%SF/C	1.5	1.5	904.8	67.9	1 258.8	36.8	171.7	165

Note: C—Cement.

1.3 试验方法

1.3.1 流动性能测试

制备好的 UHPFRC 在浇筑之前, 参照规范 GB/T 50080—2016^[18] 进行扩展度试验, 从而得到不同纤维类型及掺量下 UHPFRC 的工作性能, 其测试过程如图1所示。

1.3.2 UHPFRC 的弯曲性能测试

UHPFRC 抗弯试件加载装置采用 SANS 公司 MTS 试验机, 试验机最大加载能力为 300 kN, 通过分阶段位移控制进行加载, 其位移控制精度为 0.001 mm, 加载点的静挠度作为试件的挠度值。试件开裂前保持加载速率 $v=0.1$ mm/min; 试件开裂后以 $v=0.2$ mm/min 的加载速率加载, 试件达到极限荷载后以 $v=0.5$ mm/min 的加载速率加载至峰值荷载的 20%~30% 时停止加载。

1.3.3 数字图像测量技术 (DIC)

应变和位移变化监测采用西安新拓三维光测科技有限公司的三维全场应变测量系统 XTDIC 和粘贴应变片的方法。DIC 是一种全程无接触的数字图像测试方法, 通过对高清相机在不同加载时刻记录的图像进行处理分析, 来获得试件的变形情况^[6]。DIC 使用前, 需对试件监测面进行散斑制作, 并放置于试件正前方计算距离处, DIC 测试系统见图2所示。应变片粘贴于试件底部跨中

位置, 粘贴前需对粘贴位置打磨光滑, 并覆盖 704 硅胶进行防潮保护, 应变片数据使用东华设备 602 静态采集仪采集。

2 试验结果

2.1 试验结果数据

表3显示了各组 UHPFRC 试件的扩展度及实测抗弯强度平均值。



图1 超高性能水泥基复合材料 (UHPFRC) 的扩展度测试

Fig. 1 Expansion test of ultra-high performance fiber reinforced cementitious (UHPFRC)

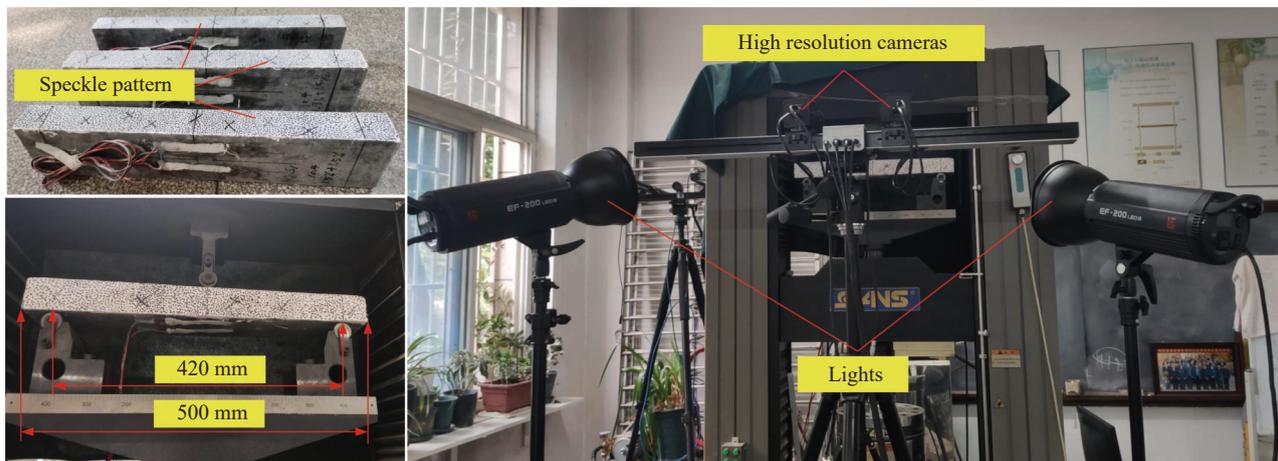


图2 数字图像测量技术 (DIC) 测试配置

Fig. 2 Test configuration of the digital image correlation (DIC) technique

表3 UHPFRC 试件的试验结果

Table 3 Test results of the UHPFRC specimens

Group	Slump flow value/mm	Bending strength/MPa
2%POM-0%SF/C	426	13.4
3%POM-0%SF/C	380	11.6
0%POM-3%SF/C	560	13.9
1%POM-1%SF/C	495	12.9
1.5%POM-1.5%SF/C	460	13.9

2.2 试件破坏过程

试件在既定加载速率下稳定加载，加载初期，由于试件与 MTS 加载机器“贴合”问题，个别试件的荷载与挠度均增长较快，荷载-挠度曲线表现为下凸形态^[17]，加载前期各组试件荷载与挠度成线性增长。共聚甲醛纤维 UHPFRC 抗弯试件加载到峰值时，发出轻微“砰砰”响声，试件跨中附近出现 1~2 条竖向裂缝，荷载骤降至峰值荷载的 39%~63%，随后继续加载，裂缝不断向上发展，加载至峰值荷载的 20% 左右停止加载。

混杂纤维 UHPFRC 抗弯试件加载至峰值前未有明显响动，加载至峰值时，出现轻微“砰砰”响声，试件跨中附近出现 1 条竖向裂缝，荷载降至峰值荷载的 55%~84%，随后继续加载，伴随着纤维拔出的“吡吡”声，众多微裂缝形成一条锯齿状宏观裂缝，裂缝不断向上发展，宽度不断增大，试件侧面出现基材“剥出”现象，但由于纤维的桥接作用，侧面基材“剥出”但未“剥落”，只有少量 UHPFRC 粉末掉落，加载至峰值荷载的 30%~40% 时停止加载。

钢纤维 UHPFRC 抗弯试件加载至峰值荷载的

70%~80% 时，试件跨中附近出现 1 条由众多微裂缝组成的锯齿状斜裂缝，随着加载的继续，裂缝斜向上延伸，伴随着纤维被拉出来的“吡吡”声，试件裂缝处有粉末掉落，加载到峰值后，试件承载力不断下降，加载至峰值荷载的 30% 左右时，停止加载。

各组 UHPFRC 试件持荷能力较强，停止加载时，试件仍能保持较好的完整性，各组试件的裂缝发展和破坏形态如图 3 所示。可以发现，共聚甲醛纤维 UHPFRC 试件裂缝都比较平整，混杂纤维 UHPFRC 试件、钢纤维 UHPFRC 试件的裂缝大多成锯齿状。这是由于共聚甲醛纤维弹性模量较小，钢纤维弹性模量较大，基体初裂后，共聚甲醛纤维 UHPFRC 试件中的共聚甲醛纤维随着加载的进行不断被拉长，裂缝随之不断平稳扩展；共聚甲醛纤维和钢纤维协同作用^[19]的混杂纤维 UHPFRC 试件和钢纤维 UHPFRC 试件中钢纤维弹性模量大、抗拉强度高，受力时，首先从相对薄弱的纤维与基体粘结界面开始破坏，钢纤维在加载过程中不断被“拉出”，再加上纤维的各向分布，从而呈现出由众多微裂缝组成的锯齿状裂缝。

3 结果与讨论

3.1 UHPFRC 试件 DIC 测量结果验证

UHPFRC 试件的三点弯曲试验过程中，采取 DIC 对试件的变形情况进行监测，DIC 采集频率为 5 张/s，此外布设应变片与之进行对比。相关研究表明，DIC 对于试件表面局部区域的应变测量，可基于虚拟引伸计^[20-21]测量得到，但虚拟引伸计的长度和位置对 DIC 测量结果影响较大^[22]，

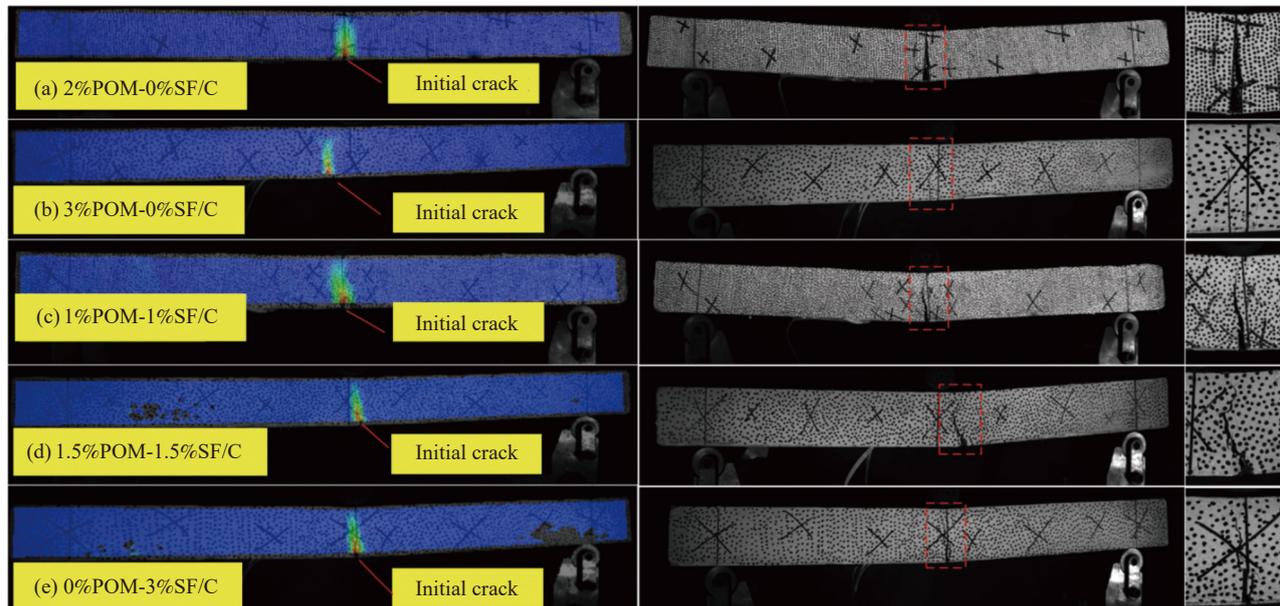


图3 各组 UHPFRC 试件裂缝发展和破坏形态

Fig. 3 Crack developments and failure modes of each group of UHPFRC specimens

为方便对比, 本文选取与应变片等长的虚拟引伸计对试件跨中应变进行测量。以共聚甲醛纤维 UHPFRC 试件、混杂纤维 UHPFRC 试件为例进行分析, DIC 与应变片测量的荷载-应变曲线如图 4 所示。可知: DIC 与应变片测得的应变数据在弹性阶段具有很好的一致性, 这与文献 [20] 的结论相同。当试件开裂进入塑性阶段后, 应变片失效, DIC 可继续工作, 监测试件受力全过程的变形情况。同时, 如图 3 所示, 采用 DIC 捕捉、分析试件表面的变形情况, 同时可监测裂缝的产生和发展过程, 解决试件在加载过程中肉眼对初裂难以监测的问题。

3.2 纤维对 UHPFRC 试件流动性能的影响

图 5 给出了 5 组试件的扩展度图, 可直观地看出各组试件的工作性能。可知, 有 4 组试件的扩展度可达 400 mm 以上, 0%POM-3%SF/C 组试件的扩展度最好, 可达到 560 mm; 共聚甲醛纤维对 UHPFRC 的扩展度影响较大, 与 0%POM-3%SF/C 组试件相比: 3%POM-0%SF/C 组试件的纤维体积掺量相同, 且同为单掺型试件, 其扩展度降低了 32.1%; 2%POM-0%SF/C 组试件的扩展度降低了 23.9%, 1%POM-1%SF/C 组试件的扩展度降低了 11.6%; 1.5%POM-1.5%SF/C 组试件的纤维体积掺量同为 3vol%, 其扩展度降低了 17.9%。因此, 无

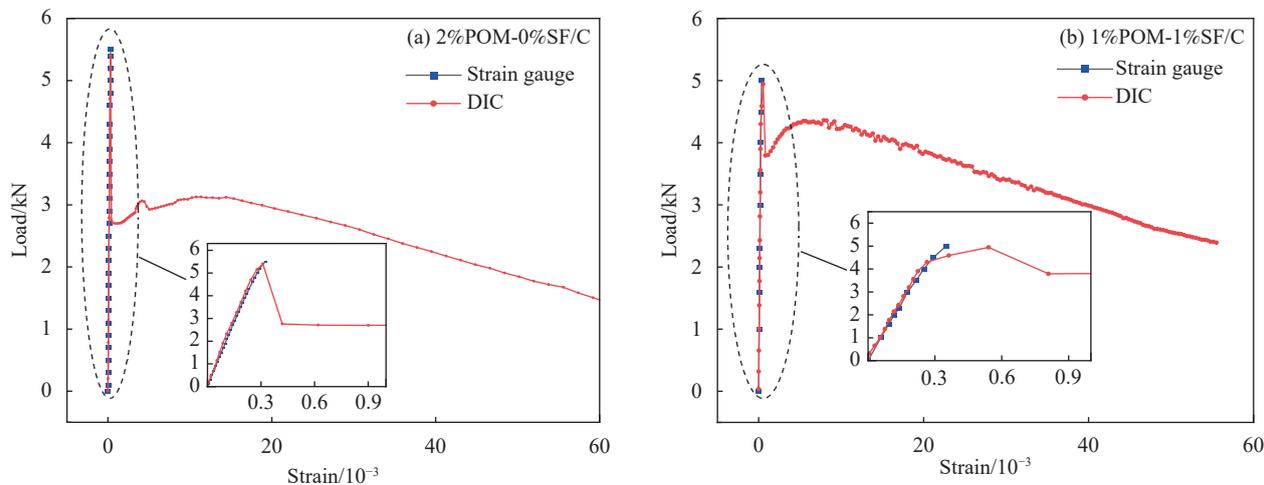


图4 UHPFRC 试件荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of UHPFRC specimens

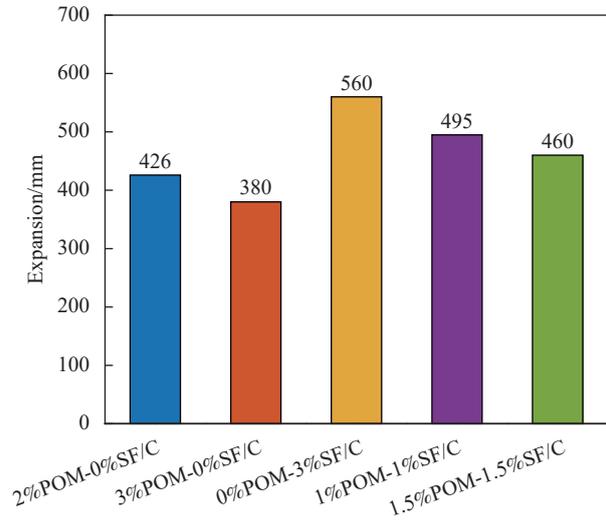


图5 UHPFRC 试件扩展度

Fig. 5 Expansion of UHPFRC specimens

论是单掺型试件还是混杂型试件, 各组试件的工作性能均随着共聚甲醛纤维体积掺量的增加而降低。

3.3 UHPFRC 试件荷载-挠度曲线

图6为各组试件的荷载-挠度曲线, 可用于准确表征各组UHPFRC试件的抗弯力学性能, 对各组试件的特征值取算数平均值进行分析。可知, 所有试件受力过程均可划分为3个阶段: (1) 正常工作阶段, 此阶段无裂缝产生, 各组试件产生弹性变形, 直到萌生微裂缝, 纤维开始发挥作用, 此阶段结束; (2) 裂缝发展阶段, 此阶段各组试件表现出应变软化和应变硬化的特征^[23]; (3) 破坏阶段, 裂缝迅速扩展, 试件损伤急剧增加, 部分纤维被完全拔出、拉断退出工作。对相同纤维体积掺量下不同纤维类型、相同纤维类型下不同纤维体积掺量的情况分别进行分析。

图6(a)、图6(b)所示试件的纤维体积掺量为2vol%。可知, 2%POM-0%SF/C和1%POM-1%SF/C的峰值荷载均在弹性极限处, 且两者相差不大, 2%POM-0%SF/C的峰值荷载为5.33 kN, 仅比1%POM-1%SF/C高4.2%。但2%POM-0%SF/C的开裂挠度为0.65 mm, 比1%POM-1%SF/C高32%。当试件开裂时, 2%POM-0%SF/C的承载力骤降53.8%, 幅度较大, 而1%POM-1%SF/C与之相比, 幅度较小, 仅降低了26.4%。UHPFRC中的纤维发挥荷载承受和能量吸收的作用, 当基体开裂时, 弹性模量更高的钢纤维可以更好地桥接开裂基体^[24], 从而在开裂的瞬间, 1%POM-1%SF/C的荷载骤降幅度与2%POM-0%SF/C相比较小。同时, 图6(a)还

可以看出2%POM-0%SF/C的持荷能力较强, 荷载下降段承载力下降缓慢, 下降速率小于1%POM-1%SF/C, 这说明共聚甲醛纤维可提高UHPFRC的延性, 延性可定义为破坏挠度与开裂挠度的比值。

图6(c)~6(e)所示试件的纤维体积掺量为3vol%。3%POM-0%SF/C的峰值荷载最低, 仅为4.62 kN, 分别比0%POM-3%SF/C和1.5%POM-1.5%SF/C低16.5%、16%。此外, 1.5%POM-1.5%SF/C的开裂挠度最大, 裂前变形能力更好, 其开裂挠度可达0.56 mm, 分别比3%POM-0%SF/C和0%POM-3%SF/C高36.6%和16.7%。同时发现, 3%POM-0%SF/C的承载力在下降段下降速度最慢, 1.5%POM-1.5%SF/C次之, 这说明共聚甲醛纤维的掺量越多, UHPFRC试件在极限荷载后的持荷性能越好。

图6(a)、图6(c)为共聚甲醛纤维单掺型试件的荷载-挠度曲线, 可知: 当共聚甲醛纤维体积掺量为2vol%时, 具有更高的峰值荷载和更大的初裂挠度, 2%POM-0%SF/C组试件比3%POM-0%SF/C组试件的峰值荷载高15.5%, 初裂挠度大58.5%。对破坏后的试件断面进行对比(图7), 发现与2%POM-0%SF/C组试件相比, 3%POM-0%SF/C组试件断面的纤维虽然整体数量更多, 但是分布不均匀, 表现为纤维方向杂乱, 抗弯拉水平方向的分布纤维较少, 且试件底部纤维分布较少, 从而导致了UHPFRC基体更早开裂, 同时这也反映了3%POM-0%SF/C组试件的流动性较差, 与流动性测试结果吻合。同时, 两组共聚甲醛纤维UHPFRC试件在极限荷载后均表现出了较强的持荷性能。

图6(b)、图6(d)为混杂纤维UHPFRC试件的荷载-挠度曲线, 可知: 随着混杂纤维掺量的增加, 试件的抗弯性能得到了一定的提升, 但提升幅度并不显著, 1.5%POM-1.5%SF/C的峰值荷载和开裂挠度分别比1%POM-1%SF/C组试件高7.8%和14.3%。

根据上述分析可见: 共聚甲醛纤维和钢纤维对UHPFRC基体受弯过程发挥着重要的作用, 适量体积掺量的共聚甲醛纤维可延缓UHPFRC基体的开裂。对于单掺型试件, 掺入2vol%体积掺量的共聚甲醛纤维时效果最优, 2%POM-0%SF/C组试件的峰值荷载和开裂挠度均大于3%POM-0%SF/C组试件; 对于混杂型试件, 掺入1.5vol%体积掺量的共聚甲醛纤维和1.5vol%体积掺量的钢纤维时效果更好。

3.4 UHPFRC 试件弯曲韧性

纤维增强水泥基复合材料主要通过改变裂缝

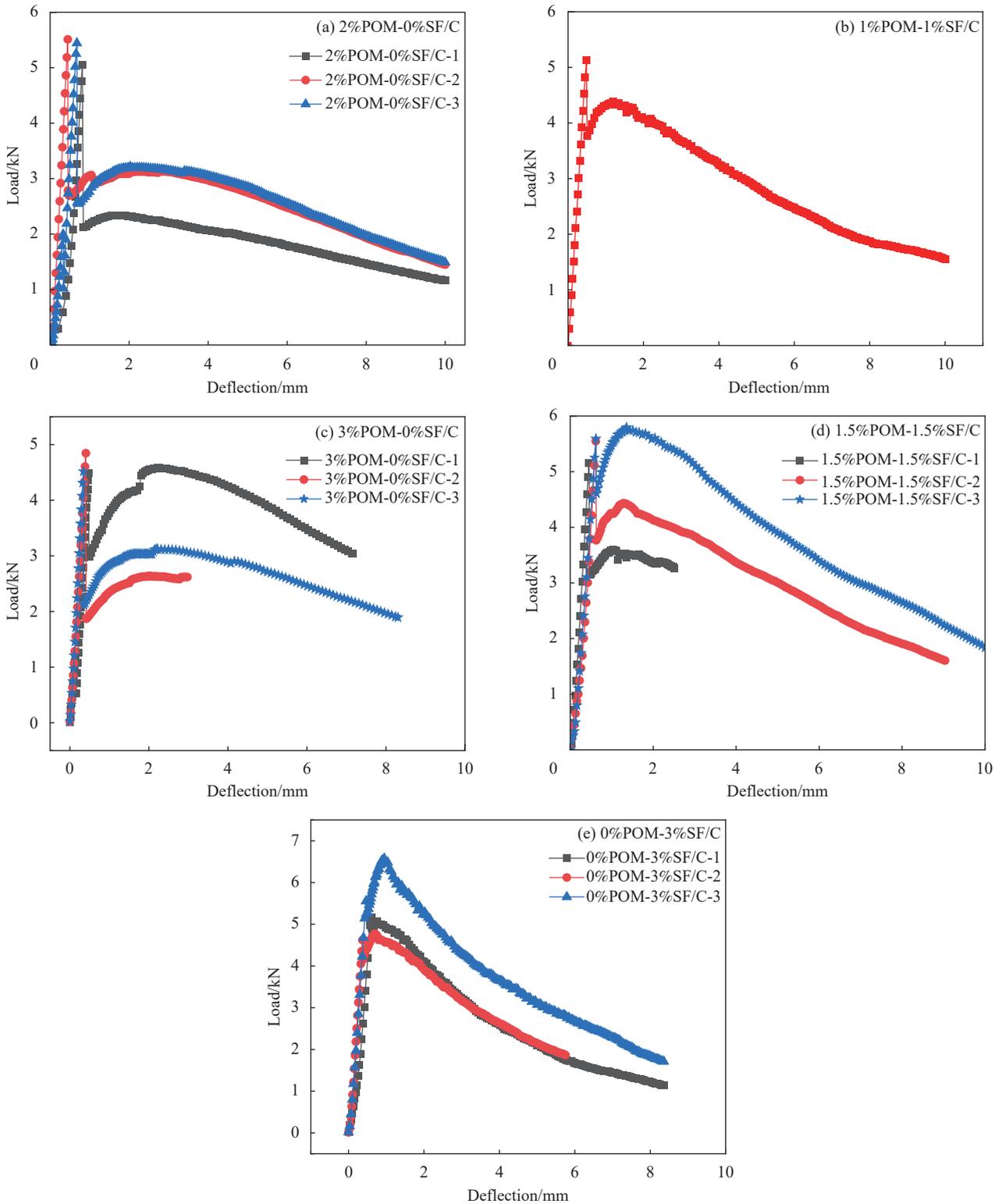


图6 UHPFRC 试件荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-deflection curves of UHPFRC specimens

尖端应变场,影响裂缝尖端的应力强度因子,降低裂缝尖端的最大应力,可延缓裂缝开展,达到增韧效果^[25]。纤维增强混凝土通常根据 ASTM C1018^[26] 或 JSCE-SF4^[27] 建议的方法来评价弯曲韧

性, ASTM C1018^[26] 法是利用 3、5.5、10.5 倍初裂挠度对应荷载-挠度曲线下的面积与初裂挠度对应荷载-挠度曲线下面积的比值 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 作为韧性指数来评价各试件的弯曲韧性; JSCE-SF4^[27] 法

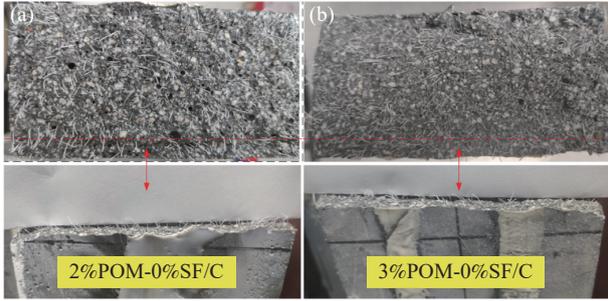


图7 2%POM-0%SF/C、3%POM-0%SF/C 试件的断面图对比

Fig. 7 Comparison of section diagrams of 2%POM-0%SF/C and 3%POM-0%SF/C specimens

是以跨中挠度达到试件跨度的 1/150 倍时计算出的平均强度值 σ (韧性因子) 来评价各试件的弯曲韧性, 平均强度值 σ 的计算公式如下所示:

$$\sigma = \frac{T_b L}{bh^2} \delta_{tb} \quad (1)$$

式中: L 为试件跨度 (mm); b 为试件宽度 (mm); h 为试件厚度 (mm); T_b 为跨中挠度达到 $L/150$ 时对应荷载-挠度曲线下的面积 (N·mm); δ_{tb} 为 $L/150$ 对应的计算值 (mm)。

本文采用这两种方法计算的各组试件弯曲韧性指标平均值如表 4 所示。

表 4 UHPFRC 试件韧性指标计算结果

Table 4 Calculation results of toughness index of UHPFRC specimens

Group	Initial crack deflection/mm	Toughness index ^[29]			T_b	Toughness factor/MPa
		I_5	I_{10}	I_{20}		
2%POM-0%SF/C	0.65	3.77	7.34	12.96	7.30	4.38
3%POM-0%SF/C	0.41	3.52	7.81	17.39	8.40	5.04
0%POM-3%SF/C	0.48	5.52	10.27	16.47	11.93	7.16
1%POM-1%SF/C	0.49	4.15	7.98	13.69	10.80	6.48
1.5%POM-1.5%SF/C	0.56	4.84	10.03	16.87	11.95	7.17

Notes: T_b —The area under the load-deflection curve corresponding to the mid-span deflection reaching $L/150$ (N·mm); I_5, I_{10}, I_{20} —The ratio of the area under the load-deflection curve corresponding to deflections of 3, 5.5, and 10.5 times the initial cracking deflection to the area under the load-deflection curve corresponding to the initial cracking deflection.

采用 ASTM C1018 法^[26] 来评价各组试件的韧性能力, 得出的韧性指数趋势如图 8 所示。可以看出, 各组试件韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 不断增大。体积掺量为 3vol% 的试件中, 0%POM-3%SF/C、1.5%POM-1.5%SF/C 韧性最好, 且两组试件韧性指数相差不大, 0%POM-3%SF/C 的韧性指数 I_5 、 I_{10} 分别

比 1.5%POM-1.5%SF/C 高 14.0%、2.4%, 1.5%POM-1.5%SF/C 的韧性指数 I_{20} 比 0%POM-3%SF/C 高 2.4%。3%POM-0%SF/C 的韧性指数 I_5 、 I_{10} 最小, 但 I_{20} 最大, 这说明 3%POM-0%SF/C 试件在荷载下降段下降速度最为缓慢。

对比体积掺量为 2vol% 的两组试件 1%POM-1%SF/C 和 2%POM-0%SF/C 可知, 1%POM-1%SF/C 的韧性指数 I_5 、 I_{10} 、 I_{20} 分别比 2%POM-0%SF/C 高 10.1%、8.7%、5.6%, 这说明纤维体积掺量为 2vol% 时, 混杂纤维 UHPFRC 试件的韧性相对较好。

采用 JSCE-SF4 法^[27] 来表征各组试件的韧性, 所得的韧性因子可以反映各组试件吸收能量的大小, 所得各组试件的韧性因子如图 9 所示。可知, 1.5%POM-1.5%SF/C > 0%POM-3%SF/C > 1%POM-1%SF/C > 3%POM-0%SF/C > 2%POM-0%SF/C, 这表明 5 组试件中, 1.5%POM-1.5%SF/C 的韧性最好, 2%POM-0%SF/C 的韧性最差。当纤维总体积掺量一定时, 混杂纤维 UHPFRC 试件的韧性好于单掺型共聚甲醛纤维 UHPFRC 试件。这与采用 ASTM C1018^[26] 法得出的结论基本相同。

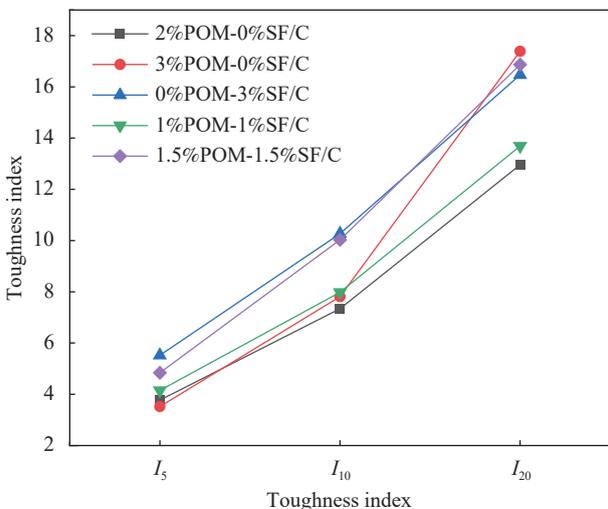


图 8 UHPFRC 试件韧性指数趋势图

Fig. 8 Trend diagram of toughness index of UHPFRC specimens

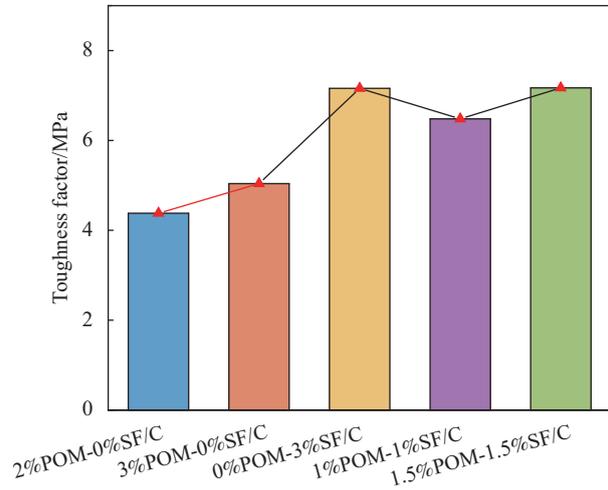


图9 UHPFRC 试件韧性因子趋势图

Fig. 9 Trend diagram of toughness factor of UHPFRC specimens

4 结论

对 5 组超高性能水泥基复合材料 (UHPFRC) 进行三点弯曲加载试验、扩展度测试。对比了单掺型 UHPFRC 试件和混杂型 UHPFRC 试件的抗弯性能, 并评价了 5 组 UHPFRC 试件的弯曲韧性, 得到以下结论:

(1) 共聚甲醛纤维对 UHPFRC 的流动性影响较大, 单掺型 UHPFRC 和混杂型 UHPFRC 的流动性均随着共聚甲醛纤维体积掺量的增加而降低。纤维单掺时, 0%POM-3%SF/C 流动性最好, 可达 560 mm, 纤维混掺时, 1%POM-1%SF/C 流动性最好, 可达 495 mm;

(2) 适量的共聚甲醛纤维可延缓 UHPFRC 基体的开裂, 增强其裂前变形能力。纤维单掺时, 2%POM-0%SF/C 的裂前变形能力最优, 开裂挠度可达 0.65 mm, 当继续增加体积掺量时, 开裂挠度反而降低; 纤维混掺时, 1.5%POM-1.5%SF/C 的裂前变形能力最优, 开裂挠度可达 0.56 mm;

(3) 对于共聚甲醛纤维 UHPFRC, 当共聚甲醛纤维体积掺量为 2vol% 时, 抗弯强度为 13.4 MPa, 继续增加体积掺量, 其抗弯强度反而降低; 对于混杂纤维 UHPFRC, 掺入 1.5vol% 体积掺量的共聚甲醛纤维和 1.5vol% 体积掺量的钢纤维时效果更好, 抗弯强度可达 13.9 MPa。共聚甲醛纤维的掺入可提升 UHPFRC 在荷载下降段的持荷能力, 纤维体积掺量越大, 下降段越平缓;

(4) 通过 ASTM C1018 法和 JSCE-SF4 法评价了各组试件的弯曲韧性能力, 均表明混杂纤维对 UHPFRC 弯曲韧性的提升更大。各组试件中,

1.5%POM-1.5%SF/C 的韧性最好, 而 3%POM-0%SF/C 和 2%POM-0%SF/C 的韧性最低。

本工作推荐 UHPFRC 混掺 1.5vol% 共聚甲醛纤维和 1.5vol% 钢纤维, 1.5%POM-1.5%SF/C 的开裂挠度大, 工作性能好, 具备较好经济效益的同时, 保证了较好的抗弯强度和弯曲韧性。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 1-24(in Chinese).
- [2] 陈宝春, 林毅焱, 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 Baochun, LIN Yijun, 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(in Chinese).
- [3] 赵人达, 赵成功, 原元, 等. UHPC 中钢纤维的应用研究进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 1-22.
ZHAO Renda, ZHAO Chenggong, YUAN Yuan, et al. Research progress on application of steel fiber in UHPC[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 1-22(in Chinese).
- [4] 王义超, 侯梦君, 余江滔, 等. 聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J]. 材料导报, 2018, 32(20): 3535-3540.
WANG Yichao, HOU Mengjun, YU Jiangtao, et al. Experimental study on mechanical properties of ultra-high ductile cementitious composites[J]. Materials Reports, 2018, 32(20): 3535-3540(in Chinese).
- [5] 黄政宇, 李操旺, 刘永强. 聚乙烯纤维对超高性能混凝土性能的影响[J]. 材料导报, 2014, 28(20): 111-115.
HUANG Zhengyu, LI Caowang, LIU Yongqiang. The effects of polyethylene fiber on the properties of UHPC[J]. Materials Reports, 2014, 28(20): 111-115(in Chinese).
- [6] 赖建中, 徐升, 杨春梅, 等. 聚乙烯醇纤维对超高性能混凝土高温性能的影响[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(4): 633-639.
LAI Jianzhong, XU Sheng, YANG Chunmei, et al. Influence of polyvinyl alcohol fibers on the properties of ultra high performance concrete at high temperature[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(4): 633-639(in Chinese).
- [7] 陈倩, 徐礼华, 吴方红, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3): 740-748, 755.
CHEN Qian, XU Lihua, WU Fanghong, et al. Experimental investigation on strength of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced ultra high performance concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(3):

- 740-748, 755(in Chinese).
- [8] 滕晓丹, 谭又文, 李朋原, 等. 钢-高强高模量聚乙烯纤维混凝土高温后力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4): 996-1001. TENG Xiaodan, TAN Youwen, LI Pengyuan, et al. Mechanical properties of steel-UHMWPE fiber reinforced concrete after high temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(4): 996-1001(in Chinese).
- [9] 晏麓晖, 张玉武, 朱林. 超高分子量聚乙烯纤维混凝土的基本力学性能[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(6): 43-47. YAN Luhui, ZHANG Yuwu, ZHU Lin. Basic mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene fiber concrete[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(6): 43-47(in Chinese).
- [10] 安宇坤, 王亚涛, 李建华. 聚甲醛纤维混凝土抗收缩与抗渗透性研究[J]. 混凝土世界, 2019(3): 64-67. AN Yukun, WANG Yatao, LI Jianhua. Study on shrinkage and permeability of polyoxymethylene fiber reinforced concrete[J]. Concrete World, 2019(3): 64-67(in Chinese).
- [11] 吕锦飞. 聚甲醛纤维混凝土性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019. LYU Jinfei. Study on properties of POM fiber reinforced concrete[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019(in Chinese).
- [12] 何越骁, 黄维蓉, 郭江川, 等. 共聚甲醛纤维超高性能混凝土高温后残余力学性能研究[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(3): 839-848. HE Yuexiao, HUANG Weirong, GUO Jiangchuan, et al. Residual mechanical properties of ultra-high performance concrete doped with copolymer formaldehyde fiber exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(3): 839-848(in Chinese).
- [13] Swiss Society of Engineers and Architects. UHPFRC—Material, design and construction: SIA 2052[S]. Zurich: Swiss Society of Engineers and Architects, 2016.
- [14] Association Française de Normalisation. Concrete—Ultra-high-performance fibre-reinforced concrete—Specifications, performance, production and conformity: NF P18-470[S]. Saint Denis: Association Française de Normalisation, 2016.
- [15] HE W, WANG C, WANG S, et al. Characterizing and predicting the tensile mechanical behavior and failure mechanisms of notched FMLs—Combined with DIC and numerical techniques[J]. *Composite Structures*, 2020, 254: 112893.
- [16] FAYYAD T M, LEES J M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 3: 1585-1590.
- [17] 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. LIANG Xingwen, HU Aoxiang, YU Jing, et al. Effect of steel fibers on the flexural response of ultra-high performance concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(3): 722-731(in Chinese).
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for performance test methods of ordinary concrete mixtures: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016(in Chinese).
- [19] ZHOU P, FENG P. Unified analysis for tailorable multi-scale fiber reinforced cementitious composites in tension[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 254: 110586.
- [20] 郭文婧, 马少鹏, 康永军, 等. 基于数字散斑相关方法的虚拟引伸计及其在岩石裂纹动态观测中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3196-3200. GUO Wenjing, MA Shaopeng, KANG Yongjun, et al. Virtual extensometer based on digital speckle correlation method and its application to deformation field evolution of rock specimen[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3196-3200(in Chinese).
- [21] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Pre-peak and post-peak rock strain characteristics during uniaxial compression by 3D digital image correlation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2541-2554.
- [22] LE D B, TRAN S D, DAO V T N, et al. Deformation capturing of concrete structures at elevated temperatures[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 210: 613-621.
- [23] KIM D J, PARK S H, RYU G S, et al. Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(11): 4144-4155.
- [24] ZENG J J, ZENG W B, YE Y Y, et al. Flexural behavior of FRP grid reinforced ultra-high-performance concrete composite plates with different types of fibers[J]. *Engineering Structures*, 2022, 272: 115020.
- [25] 曲博扬, 卿龙邦. 钢纤维增强水泥基复合材料增韧机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1522-1528. QU Boyang, QING Longbang. Toughening mechanism of steel fiber reinforced cement matrix composite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1522-1528(in Chinese).
- [26] American Society for Testing and Materials. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete using beam with third-point loading: ASTM C1018—1997[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1997.
- [27] JSCE. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: JSCE-SF4[S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineering, 1984.