文章编号:1674-2869(2024)03-0330-07

混杂纤维超高性能混凝土的弯曲力学性能研究

聂立力,周 迅,熊 伟
中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430010

摘 要:通过超高性能混凝土(UHPC)棱柱体的四点弯曲试验,研究了4种纤维掺量的长直型、端钩型和混合型钢纤维UHPC的弯拉性能,并与倒推分析法得到的UHPC拉伸性能进行对比。结果表明:纤维类型和纤维掺量对UHPC棱柱体弯拉性能的弹性阶段无明显影响,其影响主要作用在裂缝发展阶段;混合型纤维UHPC对弯拉性能的裂缝发展阶段改良效果最优,且混合型纤维提供的抗力效果较其他类型纤维更优。倒推分析法的初裂强度高于轴拉等效初裂强度,两者比值介于1.03~1.19。

关键词:超高性能混凝土;四点弯曲试验;倒推分析法;初裂强度;极限强度
中图分类号:U444 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202307008

Flexural property of fiber-doped ultra-high performance concrete

NIE Lili, *ZHOU Xun*, *XIONG Wei*
Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Wuhan 430010, China

Abstract: Flexural properties of long straight, hooked end, and hybrid steel fiber ultra-high performance concrete (UHPC) with four different fiber contents were investigated by four-point bending tests of UHPC prisms. The results were compared to the tensile properties of UHPC obtained using an inverse analysis method. It was found that fiber type and content had a minimal impact on the elastic stage of UHPC prism flexural properties but significantly affected the post-crack stage. The hybrid fiber UHPC showed the most optimal reinforcement effect on the post-crack stage, with hybrid fibers exhibiting superior resistance compared to other fiber types. The cracking strength determined by the inverse analysis method was higher than the direct-tension equivalent cracking strength, with a ratio ranging from 1.03 to 1.19.

Keywords: ultra-high performance concrete; four-point bending test; inverse analysis method; cracking strength; ultimate strength

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,UHPC)是一种具有卓越力学性能的水泥基复合材料,能够表现出超高抗压强度、抗拉强度和耐久性,是土木工程材料领域划时代意义的重大突破[1-5]。

Wu等[6]研究了3种不同纤维含量的异形钢纤维对UHPC力学性能的影响,并提出了一种基于最小二乘拟合的弯曲荷载-位移新模型。薛刚等[7]通过试验研究了活性粉末混凝土的抗压强度、抗折强度、耐高温性能等,分析了钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响;并应用扫描电子显微镜,从微观上分析了钢纤维掺量对RPC强度的影响,得到合理的钢纤维掺量为1.0%。张哲等[8]研究了钢纤维掺量对UHPC的轴拉性能的影响,并提出了轴拉应力应变和应力裂缝宽度的本构模型。

由于UHPC优越的力学性能可以提高结构的

收稿日期:2023-07-08
基金项目:湖北省建设科技计划项目(2023011)
作者简介:聂立力,硕士,高级工程师。Email: 43386680@qq.com
引文格式:聂立力, 周迅, 熊伟. 混杂纤维超高性能混凝土的弯曲力学性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):330-336.

安全性能[9-13]，故逐渐得到工程师们的青睐，在工程上的应用日益增长，其结构形式也呈现出多样化。广东省马房大桥[14]采用UHPC和钢箱梁组合形成轻型组合梁，广东省清远北江四桥[15]采用单向预应力UHPC薄壁连续箱梁新结构，钢-UHPC组合桁式拱桥未来可以实现更大跨越[16]。

UHPC具有较稳定的裂后拉伸强度，在承受弯矩处的结构设计不能忽略其抗拉强度的贡献。本文通过四点弯曲试验研究了4种纤维掺量的长直型、端钩型和混合型钢纤维UHPC的弯拉性能，并对比倒推分析法UHPC拉伸性能。

1　配合比

本文试验制备的UHPC的配合比如表1所示，其材料组分中的胶凝材料包括水泥和硅灰，水胶比为0.18，加入石英砂和石英粉来获得最大密实度，使用高效减水剂保证新拌混凝土的工作性能。本文研究钢纤维掺量及钢纤维类型对UHPC在四点加载作用下弯拉性能的影响，钢纤维类型包括长直型、混合型及端钩型，其对应的UHPC试件组别分别定义为UHPC-I、UHPC-II、和UHPC-III。混合型同时掺入长直钢纤维和端钩型钢纤维，纤维规格及掺量占比见表2。

表1　UHPC配合比

Tab. 1　The mixture proportion of UHPC

材料组分	水泥	硅灰	石英砂	石英粉	水	高效减水剂	水胶质量比
质量比	1.00	0.25	1.10	0.30	0.23	1.88	0.18

表2　纤维类型和掺量

Tab. 2　Fiber type and fiber content

试件组别	钢纤维类型	钢纤维规格	钢纤维体积掺量
UHPC-I	长直型	长直钢纤维：直径0.20 mm；长度13 mm	2.0%、2.5%、3.0%、3.5%
UHPC-II	混合型	长直钢纤维：直径0.12 mm；长度8 mm 端钩钢纤维：直径0.20 mm；长度13 mm	2.0%（长直1.0%+端钩1.0%） 2.5%（长直1.0%+端钩1.5%） 3.0%（长直1.5%+端钩1.5%） 3.5%（长直1.5%+端钩2.0%）
UHPC-III	端钩型	端钩钢纤维：直径0.20 mm；长度13 mm	2.0%、2.5%、3.0%、3.5%

2　四点弯曲试验设计

UHPC的弯拉性能通过如图1所示的四点加载装置进行测试。本研究弯拉试件尺寸和试验方法参考法国UHPC规范[17]，试验制备的UHPC棱柱体试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm，净跨为300 mm，在净跨的三等分处用记号笔画线标注，以便确定加载点和支座位置。

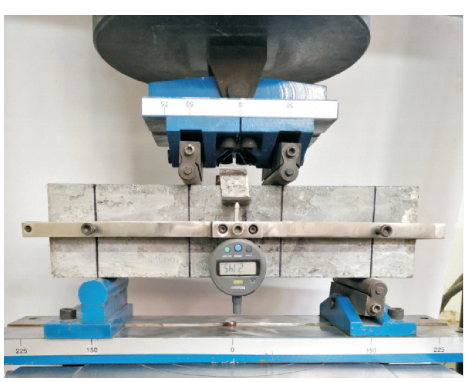


图1　四点弯曲试验装置

Fig. 1　Four-point bending test setup

荷载通过电液伺服压力机和小分配梁施加至UHPC棱柱体试件上表面的加载点位置，试件的跨中挠度为棱柱体上表面到1/2高度处的相对位移，跨中挠度通过固定在钢支架中间的千分表测得。预加载的目标荷载为10 kN，确保试验仪器正常工作；而后卸载至0，继而进行正式加载，实时记录荷载和跨中挠度，试件破坏后停止施荷。

3　结果与分析

3.1　试验荷载-挠度曲线

通过四点弯曲试验得压力机荷载和千分表位移，绘制如图2和图3所示UHPC荷载-挠度曲线。

3.1.1　纤维类型的影响　图2为不同纤维含量下钢纤维类型对荷载-挠度曲线，曲线可以划分为弹性阶段、裂缝发展阶段和失效阶段。

从图2中可知，荷载先是线性增长至约40 kN处，此时UHPC棱柱体对应的挠度较小。荷载挠度曲线的弹性阶段几乎重合，结果表明纤维类型

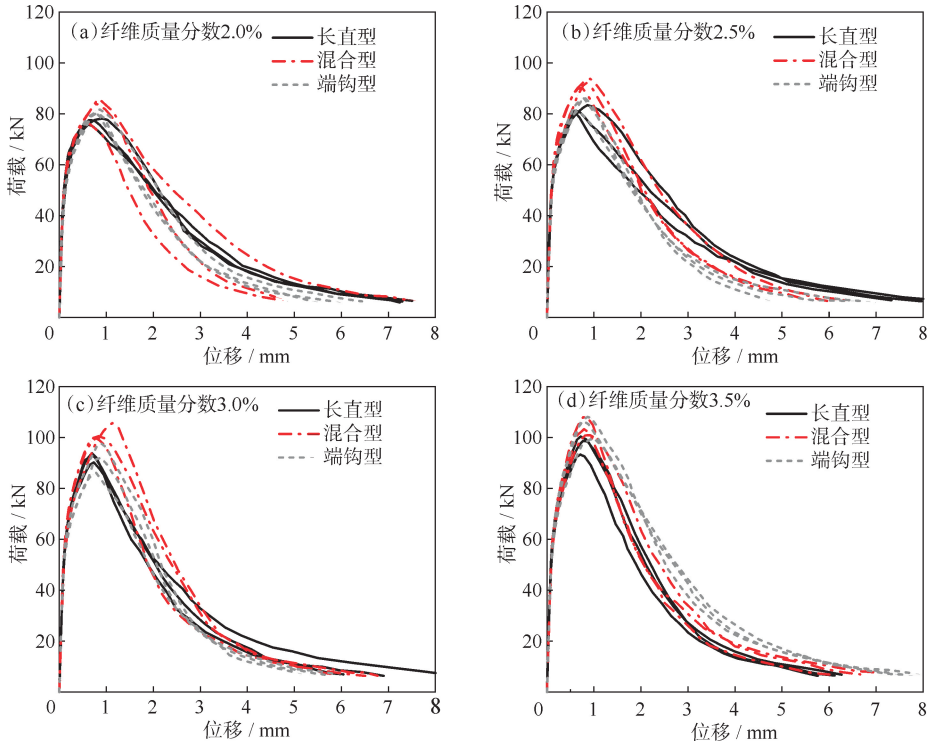


图2 纤维类型对四点弯曲试验结果的影响

Fig. 2 Effect of fiber type on the results of four-point bending test

对UHPC弯拉性能的弹性阶段无明显影响。

荷载超过40 kN后，曲线的上升坡度变缓，UHPC棱柱体的刚度变小，原因是荷载所产生的拉应力超出了UHPC基体的极限拉应力，UHPC棱柱体试件的纯弯段出现裂缝。此后跨越裂缝界面的钢纤维发挥桥接作用，限制裂缝的发展与延伸。图2中可知，不同类型钢纤维UHPC的荷载挠度曲线在裂缝发展阶段的弯拉性能存在一定程度的差异，棱柱体试件表现出不同的刚度和峰值荷载。长直型纤维UHPC棱柱体表现出的弯拉性能在3种UHPC中最差；相对于长直型纤维UHPC的弯拉性能，端钩型纤维UHPC在2.0%与2.5%掺量下的弯拉性能无明显增强改善，但是在3.0%与3.5%掺量下，端钩型纤维UHPC的弯拉性能显然得到了改良效果；混合型纤维UHPC的弯拉性能在3种类型UHPC中最优。

在荷载作用下，裂缝的发育宽度不断增加，导致部分纤维被拔出，故部分纤维的桥接作用被削弱或消失，UHPC的持荷能力衰退，荷载-挠度曲线呈现出下降趋势，UHPC进入应变软化阶段。

3.1.2 纤维掺量的影响 由图3可知，所有曲线的线性增长段几乎重合，表明钢纤维掺量对UHPC棱柱体弯拉性能的弹性阶段无明显影响。

纤维掺量是UHPC裂缝发展阶段弯拉性能的重要影响因素。随着纤维掺量增大，曲线的斜率增大，即UHPC试件的刚度变大，相同荷载大小作用下UHPC棱柱体试件的挠度显著变小，UHPC的抗裂性能显著提升。在2.0%~3.5%的掺量范围内，纤维掺量越多，UHPC棱柱体试件的极限荷载得到显著加强。

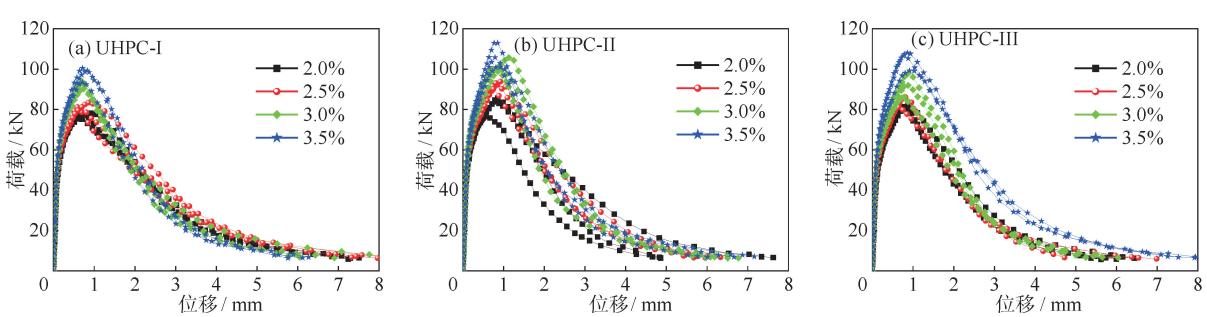


图3 纤维掺量对四点弯曲试验结果的影响

Fig. 3 Effect of fiber content on the results of four-point bending test

3.2　试验弯拉强度

表3记录了UHPC弯拉试验的初裂点和极限点时的荷载、位移和强度，通过式(1)计算得到弯拉初裂强度和极限强度：

$$\sigma_{bt} = \frac{FL}{bh^2} \tag{1}$$

式中：F分别取初裂荷载(荷载-挠度曲线中的线性极限对应的荷载)和极限荷载(荷载-挠度曲线中的峰值荷载)，L、b及h分别表示支座距离、棱柱体截面宽度和高度。

采用棱柱体进行弯拉试验获得的初裂强度$\sigma_{bt,el}$和哑铃型试件进行轴拉试验获得的初裂强度$f_{ct,el}$会受到尺寸效应的影响而明显不一致，法国UHPC规程[17]提出通过尺寸效应折减系数α(取值0.08)将弯拉试验得到的初裂强度换算得到轴拉等效初裂强度：

$$f_{ct,el} = \sigma_{bt,el} \cdot \frac{\alpha h^{0.7}}{1 + \alpha h^{0.7}} \tag{2}$$

3.2.1　弯拉初裂强度

(1)长直型纤维UHPC-I。

试验测得UHPC-I的弯拉初裂强度介于11.38~12.07 MPa，在2.0%~3.5%的掺量范围内呈现先增后减的趋势，UHPC-I-3.0%的弯拉初裂强度最大，但是UHPC-I-3.5%的弯拉初裂强度较前者出现微弱的下降。与2.0%纤维掺量的UHPC相比，UHPC-I-2.5%、UHPC-I-3.0%和UHPC-I-3.5%的弯拉初裂强度分别提高3.3%、6.1%、5.5%。

(2)混合型纤维UHPC-II。

试验测得UHPC-II的弯拉初裂强度介于11.13~13.25 MPa，在2.0%~3.5%的掺量范围内UHPC的弯拉初裂强度总体上呈现持续增强的趋势，UHPC-I-3.5%的弯拉初裂强度最大。与2.0%纤维掺量的UHPC相比，UHPC-II-2.5%、UHPC-II-3.0%和UHPC-II-3.5%的弯拉初裂强度分别提高10.9%、10.4%、18.9%。

(3)端钩型纤维UHPC-III。

试验测得UHPC-III的弯拉初裂强度介于11.13~12.61 MPa，在2.0%~3.5%的掺量范围内UHPC的弯拉初裂强度总体上呈现持续增强的趋势，UHPC-I-3.5%的弯拉初裂强度最大。与2.0%纤维掺量的UHPC相比，UHPC-III-2.5%、UHPC-III-3.0%和UHPC-III-3.5%的弯拉初裂强度分别提高8.3%、13.8%、16.5%。

经过换算得到UHPC的轴拉等效初裂强度，结果显示，UHPC-I的轴拉等效初裂强度介于7.59~8.05 MPa；UHPC-II的轴拉等效初裂强度介于7.43~8.84 MPa；UHPC-III的轴拉等效初裂强度介于7.22~8.41 MPa。2.0%纤维掺量的长直型钢纤维UHPC的弹性极限抗拉性能优于混合型和端钩型纤维UHPC；当纤维掺量高于2.0%时，混合型纤维UHPC的弹性极限抗拉性能优于单一的长直型和端钩型纤维UHPC。

综上所述，基于强度提高的百分比分析，UHPC初裂强度在一定程度上受到纤维含量和纤维类型的影响，但基于强度提高的绝对值分析，质量分数0.5%的纤维增量对UHPC初裂强度的最大提升量未超过1 MPa，所以认为UHPC初裂强度受纤维类型及纤维掺量的影响并不显著。在UHPC棱柱体未开裂阶段，荷载作用下UHPC基体材料与钢纤维协同发生微小变形，由于纤维的抗拉强度远大于UHPC基体，超出基体的变形极限后，UHPC棱柱体出现裂缝，故UHPC开裂的控制因素归因于基体材料组分。

表3　四点弯曲试验的UHPC力学特征值

Tab. 3　Mechanical characteristic values of UHPC from four-point bending test

UHPC试件类型	初裂位移 / mm	初裂荷载 / kN	初裂强度 / MPa	极限位移 / mm	极限荷载 / kN	极限强度 / MPa
UHPC-I-2.0%	0.062	37.94	11.38	0.671	78.91	23.67
UHPC-I-2.5%	0.067	39.15	11.74	0.694	87.99	26.39
UHPC-I-3.0%	0.068	40.22	12.07	0.707	94.56	28.37
UHPC-I-3.5%	0.063	40.03	12.01	0.748	100.11	30.03
UHPC-II-2.0%	0.064	37.11	11.13	0.763	83.98	25.19
UHPC-II-2.5%	0.066	41.14	12.34	0.799	93.62	28.01
UHPC-II-3.0%	0.067	40.97	12.29	0.805	102.10	30.63
UHPC-II-3.5%	0.073	44.15	13.25	0.789	104.94	31.42
UHPC-III-2.0%	0.067	37.09	11.13	0.805	83.38	25.01
UHPC-III-2.5%	0.070	39.07	11.72	0.704	87.40	26.22
UHPC-III-3.0%	0.071	41.06	12.32	0.849	97.82	29.34
UHPC-III-3.5%	0.069	42.04	12.61	0.847	107.49	32.25

3.2.2 弯拉极限强度 (1)长直型纤维UHPC-I。

试验测得UHPC-I的弯拉极限强度介于23.67~30.03 MPa,在2.0%~3.5%的掺量范围内,UHPC的极限强度随纤维掺量增加而持续显著增强。与2.0%纤维掺量的UHPC相比,2.5%~3.5%纤维掺量的UHPC极限强度分别提高了11.5%、19.9%、26.9%。

(2)混合型纤维UHPC-II。

试验测得UHPC-II的弯拉极限强度介于25.19~31.42 MPa,在2.0%~3.5%的掺量范围内,UHPC的极限强度随纤维掺量增加而持续显著增强。与2.0%纤维掺量的UHPC相比,2.5%~3.5%纤维掺量的UHPC极限强度分别提高10.9%、20.4%、24.7%。

(3)端钩型纤维UHPC-III。

试验测得UHPC-III的弯拉极限强度介于25.01~32.25 MPa,在2.0%~3.5%的掺量范围内,UHPC的极限强度随纤维掺量增加而持续显著增强。与2.0%纤维掺量的UHPC相比,2.5%~3.5%纤维掺量的UHPC极限强度分别提高4.8%、13.3%、28.9%。

当与长直型纤维UHPC相比,不同掺量的混合型纤维UHPC的极限强度分别提高4.6%~8.0%,而端钩型纤维UHPC的极限强度分别提高3.4%~7.4%。只有在2.5%纤维掺量时,端钩型纤维UHPC的极限强度比长直型纤维UHPC降低了0.6%,降低程度微小几乎忽略不计。总之,混合型与端钩型纤维能够提高UHPC的极限强度,其强度显著高于长直型纤维UHPC,且混合型纤维提供的抗力效果更优。

纤维极限强度的增强较为明显,结果表明掺入钢纤维主要增强了UHPC材料的裂后性能。UHPC棱柱体出现裂缝后,跨越裂缝界面的纤维锚固于两侧的UHPC基体,因此纤维将两侧基体桥接起来,两侧基体的应力通过纤维相互传递。持续增长的荷载使得UHPC棱柱体的受拉区变形增大,纤维锚固于基体的部分逐渐被拔出。拔出纤维的过程需要吸收外部输入的能量,纤维的端钩使得拔出时发生变形所需能量比长直型的更多,压力机输入的能量越多,UHPC所表现出的荷载抗力越大。

4 倒推分析法

单轴拉伸试验可获得UHPC的应力应变关系,但操作难度较大,且试件本身缺陷和边界条件等因素均对试验结果影响较大。四点弯曲试验难度小,但需通过倒推分析法反推计算才能得到UHPC的拉伸应力应变关系。倒推分析法是在四点弯曲试验的结果中取若干个特定点,如线性极限点和荷载极限点,然后假设一条合理形式的应力应变曲线进行计算,得到与直接拉伸试验相近的结果[17]。

4.1 应力-应变曲线

采用倒推分析法[17]将弯拉荷载-挠度曲线反推得到轴拉应力-应变曲线,如图4和图5所示。

倒推分析法的曲线主要分为线性上升和应变硬化两个阶段。施荷前期应变增量较小的情况下对应的应力增量较大,因此曲线呈现出斜率较大的线性增长直线。达到线性极限之后,曲线呈现出较长的水平平台,即应变硬化平台。应变硬化平台的应力先是出现一定程度的波动,而后趋于平缓。应变硬化平台的应力波动是因为在裂缝界面的部分纤维被拔出,失去了该部分的纤维抗力;此外,裂缝在不断发展,会增加在裂缝界面的纤维数量,在裂缝界面新增部分的纤维提供的抗力也是导致应变硬化平台的荷载波动的原因。

纤维类型的影响:由图4可知,纤维掺量为2.0%~3.0%时,混合型纤维UHPC的应变硬化平台处于最高位,次之是长直型和端钩型纤维UHPC。纤维掺量为3.5%时,混合型和端钩型纤维UHPC的应变硬化平台最高且较为接近,而长直型纤维UHPC的应变硬化平台最低。混合型纤维与基体协同受力作用更加突出,其级配效应[19]改善混凝土的抗拉性能,表现出更好的拉伸应力应变特性。

纤维掺量的影响:从图5可知,纤维掺量越高,应变硬化平台所处位置越高,即增加纤维掺量能够提高应变硬化平台的应力。

4.2 拉伸性能特征值

表4汇总了不同纤维类型和纤维掺量的UHPC拉伸性能特征值,包括倒推分析法的初裂应变和初裂强度以及轴拉等效初裂强度。

长直型纤维UHPC初裂应变介于(179~188)×10^{-6},混合型纤维UHPC初裂应变介于(173~210)×10^{-6},端钩型纤维UHPC初裂应变介于(179~217)×10^{-6}。结果表明,混合型和端钩型纤维UHPC的初裂应变比长直型纤维的略微偏高,但所有类型UHPC的应变均在200×10^{-6}左右,且应变差值不大。

倒推分析法的初裂强度和轴拉等效初裂强度的结果对比见表4,结果显示,UHPC的倒推分析

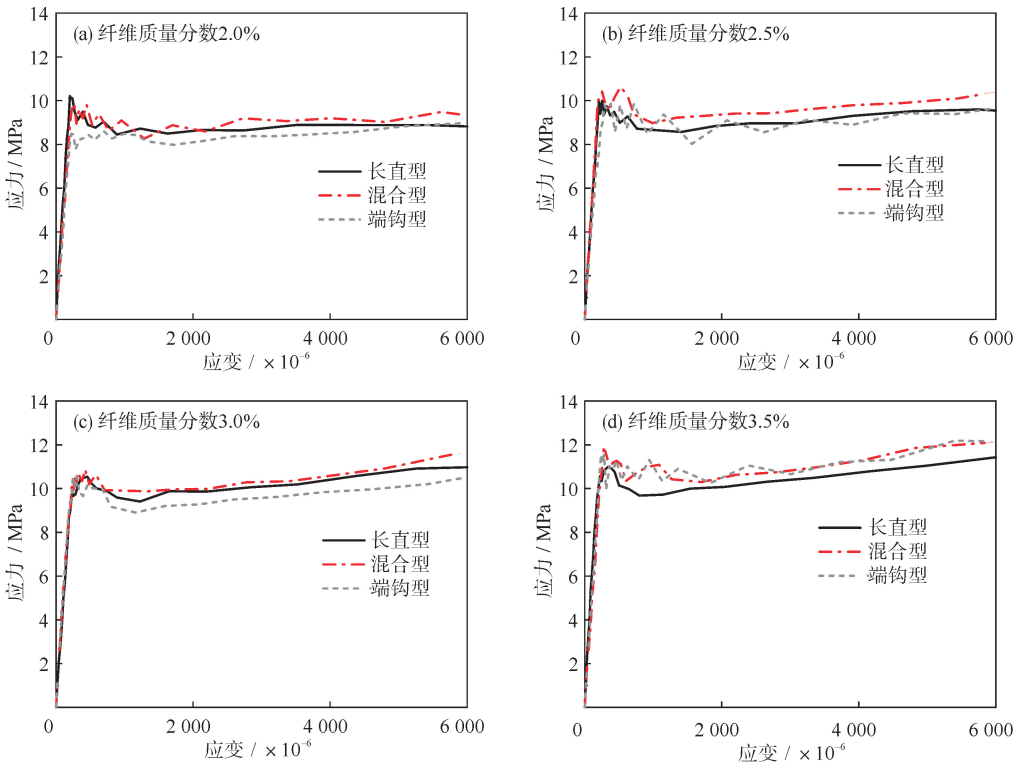


图4　纤维类型对倒推分析法结果的影响

Fig. 4　Effect of fiber type on the results by inverse analysis method

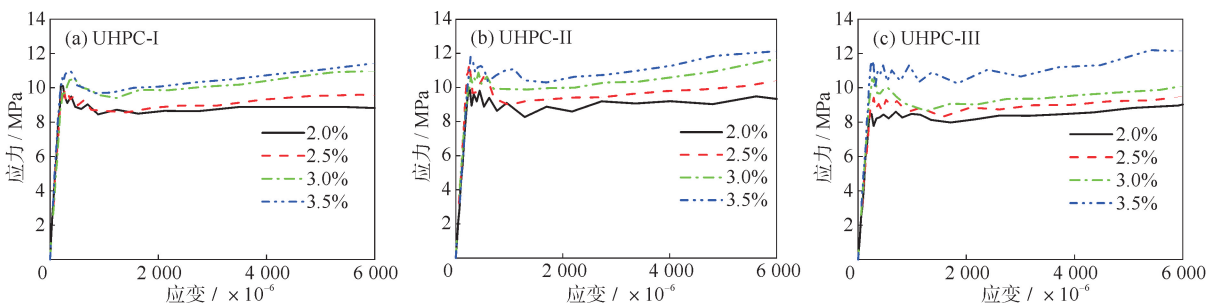


图5　纤维掺量对倒推分析法结果的影响

Fig. 5　Effect of fiber content on the results by inverse analysis method

表4　倒推分析法的特征值

Tab. 4　Characteristic value of inverse analysis method

UHPC试件类型	倒推分析法初裂应变 / ×10⁻⁶	倒推分析法初裂强度① / MPa	轴拉等效初裂强度② / MPa	①与②比值
UHPC-I-2.0%	179	8.82	7.59	1.16
UHPC-I-2.5%	188	9.01	7.84	1.15
UHPC-I-3.0%	187	8.71	8.05	1.08
UHPC-I-3.5%	180	9.56	8.01	1.19
UHPC-II-2.0%	196	8.63	7.43	1.16
UHPC-II-2.5%	173	9.14	8.24	1.11
UHPC-II-3.0%	206	8.65	8.20	1.05
UHPC-II-3.5%	210	9.76	8.84	1.10
UHPC-III-2.0%	198	8.05	7.22	1.11
UHPC-III-2.5%	217	8.97	7.82	1.15
UHPC-III-3.0%	191	8.81	8.22	1.07
UHPC-III-3.5%	179	8.67	8.41	1.03

法的初裂强度介于8.05~9.76 MPa，而轴拉等效初裂强度介于7.22~8.84 MPa。显然，倒推分析法的初裂强度高于轴拉等效初裂强度，但两者比值介于1.03~1.19，总体较为接近。

5 结 论

本文通过四点弯曲试验研究钢纤维类型与纤维掺量对UHPC的弯拉性能的影响，以及探讨倒推分析法的初裂强度和轴拉等效初裂强度的结果之间的差异，结论如下：

(1)纤维类型和纤维掺量对UHPC棱柱体弯拉性能的弹性阶段无明显影响，其影响主要作用在裂缝发展阶段；混合型纤维UHPC对弯拉性能的裂缝发展阶段改良效果最优，次之为端钩型纤维UHPC，而长直型纤维UHPC在3种类型UHPC中表现最差。

(2)混合型与端钩型纤维能够提高UHPC的极限强度，其强度显著高于长直型纤维UHPC，分别提高了4.6%~8.0%和3.4%~7.4%，但混合型纤维提供的抗力效果更优。

(3)倒推分析法的初裂强度高于轴拉等效初裂强度，两者比值介于1.03~1.19。

参考文献

[1] 陈宝春，韦建刚，苏家战，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.

[2] 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.

[3] 郑文忠，吕雪源.活性粉末混凝土研究进展[J].建筑结构学报，2015，36(10)：44-58.

[4] 周启，程子扬，陈旭勇，等.再生粗骨料对不同强度等级混凝土性能的影响[J].武汉工程大学学报，2022，44(5)：534-539.

[5] 王佳杰，赵依纯，孙志腾，等.PVA纳米纤维自增强薄膜的制备及性能研究[J].化学与生物工程，2021，38(3)：20-25.

[6] 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，2016，103：8-14.

[7] 薛刚，张夏.钢纤维掺量对活性粉末混凝土基本力学性能的影响[J].硅酸盐通报，2018，37(3)：934-938.

[8] 张哲，邵旭东，李文光，等.超高性能混凝土轴拉性能试验[J].中国公路学报，2015(8)：50-58.

[9] NIU Y F，WEI J X，JIAO C J. Crack propagation behavior of ultra-high-performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid steel fibers under flexural loading [J]. Construction and Building Materials，2021，294：123510.

[10] 周美丽，陈冰雁，陈昊，等.常温养护超高性能混凝土受压性能研究[J].结构工程师，2021，37(1)：183-190.

[11] 张文华，张仔祥，刘鹏宇，等.多尺度纤维增强超高性能混凝土的轴心抗拉和抗压行为[J].硅酸盐学报，2020，48(8)：1155-1167.

[12] 陈金盛.UHPC加固RC桥墩的全过程弯矩-曲率曲线研究[J].结构工程师，2020，36(5)：160-165.

[13] 李逸翔.膨胀剂对约束条件下UHPC早期抗裂性能影响的试验研究[J].结构工程师，2020，36(1)：136-141.

[14] CAO J H，SHAO X D，ZHANG Z，et al. Application of an innovative light-weighted composite bridge deck system [C]// Proceedings of 3rd orthotropic bridge conference，Sacramento，California，USA：International Union of Laboraies and Experfs in，2013：466-472.

[15] 鲁邦泽，邵旭东，邱明红，等.密集隔板UHPC箱梁体外预应力束转向构造研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版)，2020，39(1)：51-59，66.

[16] 邵旭东，何广.800 m级钢-UHPC组合桁式拱桥概念设计与可行性研究[J].中国公路学报，2020，33(2)：73-82.

[17] Association Française de Normalisation (AFNOR). Ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UPHFRC)- specification，performance，production and conformity：NF P 18-470 [S]. Francis de Pressense：French Standard Institute，2016.

本文编辑：张 瑞