第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200207

超高性能混凝土厚度对轴拉应力–应变–裂缝的影响

刘琼伟[1,2]，邵旭东[1,2]，邱明红[1,2]，李盼盼[1,2]，刘连胜[1,2]，吕德堡[1,2]

(1. 湖南大学土木工程学院，长沙 410082；2. 湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室，长沙 410082)

摘　要：对 3 种不同厚度的弧形狗骨头形状超高性能混凝土(UHPC)试件开展直接拉伸试验，分析了 UHPC 轴拉应力、应变、裂缝之间的关系。研究表明：随着试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，UHPC 的抗拉强度略有提高，限制裂缝发展能力增强，应变能力显著下降，应变软化速率增加；在裂缝宽度不超过 0.2 mm 时，UHPC 的裂后应力略有提高，主裂缝形成后，裂缝发展速率和裂后应力下降速率相应增大。由主裂缝宽度拟合得到拉伸应变值，发现 UHPC 试件的主裂缝发展过程与应变软化阶段吻合较好。

关键词：超高性能混凝土；直接拉伸试验；抗拉强度；应变能力；裂缝发展
中图分类号：U444　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1168–09
网络出版时间：2020–06–23



Effect of Thickness of Ultra-High Performance Concrete on Its Axial Tensile Stress-Strain-Crack

LIU Qiongwei[1,2], *SHAO Xudong*[1,2], *QIU Minghong*[1,2], *LI Panpan*[1,2], *LIU Liansheng*[1,2], *LYU Debao*[1,2]
(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Direct tensile tests were carried out on three types of ultra-high performance concrete (UHPC) specimens with different thicknesses of arc-shaped dog bone shape, and the relationship among axial tensile stress, strain, and crack of UHPC was analyzed. The results show that the tensile strength of UHPC increases slightly, the ability to limit crack development increases, the strain capacity decreases significantly, and the strain softening rate increases as the specimen thickness decreases from 100 mm to 30 mm. When the crack width is less than 0.2 mm, the post-crack stress of UHPC increases slightly. After the main crack forms, the crack development rate and the post-crack stress decline rate increase correspondingly. The tensile strain value is fitted from the main crack width, and it is indicated that the main crack development process of UHPC specimen be in reasonable agreement with the strain softening stage.

Keywords: ultra-high performance concrete; direct tensile test; tensile strength; strain capacity; crack development

超高性能混凝土(UHPC)自 20 世纪末问世以来，凭借其优越的力学性能和耐久性，推动着土木工程结构向轻、薄、大跨方向发展[1–3]。与普通混凝土相比，UHPC 的突出优势在其优异的抗拉性能，可有效减少结构钢筋用量，减轻结构自重，提高结构的抗裂性能。因此，对 UHPC 抗拉性能进行系统的研究对结构设计和工程应用具有重大意义[4]。

直接拉伸试验能够直观反映 UHPC 的轴拉性能，但试件形状的选择对试验的成功与否有着至关重要的影响[4]。国内外诸多学者采用各种形状的试件开展直接拉伸试验[5–14]，发现钢纤维种类、形状、掺量、分布取向和试件尺寸都会影响 UHPC 的轴拉

收稿日期：2020–03–26。　修订日期：2020–04–01。
基金项目：国家重点研发计划(2018YFC0705400)；国家自然科学基金(51778223)；湖南省科技重大专项(2017SK1010)；广东省交通运输厅 2017 年重大科技专项(科技 2017-01-002)；湖南省研究生科研创新项目(CX2017B119)。
第一作者：刘琼伟(1996—)，男，硕士研究生。
通信作者：邵旭东(1961—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–03–26.　**Revised date:** 2020–04–01.
First author: LIU Qiongwei (1996−), male, Master candidate.
E-mail: 854636505@qq.com
Correspondent author: SHAO Xudong (1961−), male, Ph.D., Professor.
E-mail: shaoxd@vip.163.com

性能。Frettlöhr 等[6]研究了试件厚度和宽厚比对 UHPC 受拉性能的影响，发现 UHPC 的抗拉强度和抗弯强度均随试件厚度的减小而提高，且几乎不受试件宽厚比的影响。Nguyen 等[8]研究了试件长度、厚度、体积和截面面积对 UHPC 轴拉性能的影响，发现不同试件尺寸对 UHPC 的抗拉强度影响不大，但随着试件厚度的增加，UHPC 的应变能力明显提高。Schultz-Cornelius 等[9]研究发现，UHPC 的抗拉强度和抗弯强度均随试件厚度的减小而有所提高。Paschalis 等[15]对不同厚度的棱柱体试件开展四点弯曲试验，发现 UHPC 的抗弯强度随试件厚度的减小而提高。Nguyen 等[16]、Yoo 等[17]研究了不同尺寸棱柱体试件的弯拉性能，观察到明显的尺寸效应，随着试件尺寸的增大，抗弯强度和归一化挠度显著减小。目前国内外关于 UHPC 尺寸效应的研究还很有限，大多数学者比较关注试件尺寸对 UHPC 抗拉强度的影响，很少从应力、应变、裂缝 3 方面系统研究试件尺寸对 UHPC 轴拉性能的影响。

本工作中以试件厚度和钢纤维长径比为主要试验变量，设计了 3 种试件厚度，分别为 100、50、30 mm，采用的弧形狗骨头形状试件开展直接拉伸试验[18]，研究试件厚度和钢纤维长径比对 UHPC 抗拉强度、应变能力、裂缝发展等轴拉性能的影响。

1　实验

1.1　材料与性能

选择长径比为 65 和 100 的两种平直型钢纤维，分别掺入 UHPC 基体材料中，形成 A、B 两类 UHPC，配合比如表 1 所示。钢纤维参数和 UHPC 力学性能如表 2 所示。

选择钢制模具，将新拌 UHPC 从模具一端倒入，直至充满模具。新浇筑的试件静置在阴凉处，自然养护 48 h 后拆模，接着在 90 ℃以上的水蒸汽内养护 48 h，待其自然冷却至室温时即可开展试验研究。根据《活性粉末混凝土》[19]中推荐的测试方法，测试了 UHPC 的立方体抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量和抗折强度，如表 2 所示。

表 1　UHPC 配合比

Table 1　Matrix composition of UHPC　kg/m^3

Basis material of UHPC							Steel fiber
Cement	Quartz sand	Silica fume	Quartz powder	Fly ash	Water reducer	Water	
771.2	848.4	154.2	154.2	77.1	20.1	180.5	157.5

表 2　掺加 2%平直型钢纤维参数和 UHPC 力学性能

Table 2　Characteristics of 2% steel fibers and mechanical properties of UHPC

Sample No.	Size of steel fiber/mm		Cube compressive strength f_{cu}/MPa	Axial compressive strength f_c/MPa	Elasticity modulus E_c/GPa	Flexural strength f_f/MPa
	Length	Diameter				
LZ-A						
MZ-A	13	0.2	170.95	157.43	54.79	27.16
SZ-A						
LZ-B						
MZ-B	20	0.2	185.60	170.77	52.28	28.85
SZ-B						

Note: “LZ” stands for the specimen with a thickness of 100 mm, “MZ” stands for the specimen with a thickness of 50 mm, and “SZ” stands for the specimen with a thickness of 30 mm; “A” and “B” respectively represent two types of UHPC, the length-diameter ratio of steel fiber adulterated in type A UHPC is 65, the length-diameter ratio of steel fiber adulterated in type B UHPC is 100.

1.2　试件设计

采用弧形狗骨头形状试件开展直接拉伸试验，如图 1 所示。根据法国 UHPC 规范 NF P18-710[20]中关于厚薄试件的划分标准和实际 UHPC 工程中不同类型结构的板件厚度[3]，设计 3 种试件厚度：100 mm、50 mm 和 30 mm，相对应的 A 类 UHPC 试件分别属于厚试件、厚试件、薄试件，相对应的 B 类 UHPC 试件分别属于厚试件、薄试件、薄试件。一共设置 6 组试验，每组 3 个试件，共 18 个试件。

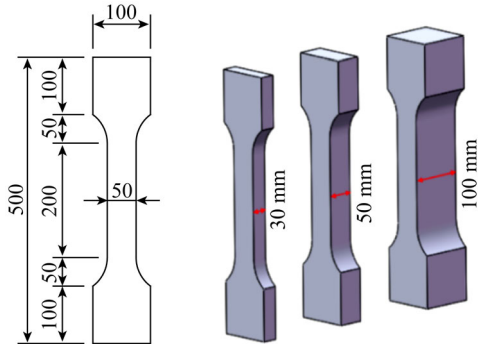


图 1　试件尺寸图

Fig. 1　Diagram of specimen size

利用 60 t 大行程万能试验机进行直接拉伸试验，试件固定在钢制夹具上，夹具端部通过双向球铰与试验机夹头连接[13]。为防止试件主裂缝出现在弧形段内，本次试验在试件的弧形段外贴碳纤维布以强化其截面受力。在试件 4 个侧面的中间位置粘贴应变片，用于验证试验开始时试件是否处于轴心受拉状态。在试件前后两个侧面分别架设 2 个电子引伸计，标距 150 mm，用于测量试件伸长量，进而转换成应变值。

采用试验机夹头位移控制加载，加载速率0.01 mm/min，实时采集荷载和电子引伸计示数。每加载0.1 mm后，保持试验机夹头位移不变，观察试件是否开裂，若出现裂缝，利用裂缝观测仪测量裂缝宽度并记录。当加载力下降至最大荷载的20%时，停止试验。

2 结果与讨论

2.1 结果

图2为试件的应力–应变曲线。每组试验得到的3条试验曲线之间存在一定的差异，取3条试验曲线应力的平均值，绘制平均应力–应变曲线[14]。采用试件峰值应力不低于初裂应力的力学条件，判别应变硬化特性[21]。所有试件的应力–应变曲线整体形状大致相同，表现出受拉应变硬化特性，具体可以划分成线弹性段、应变硬化段和应变软化段3个阶段[22]。

试验初期，应力和应变呈线性关系，试件处于线弹性阶段。当应变增加到180×10^{-6}左右时，试件处于线弹性阶段末，标距内随机出现初始微裂纹，

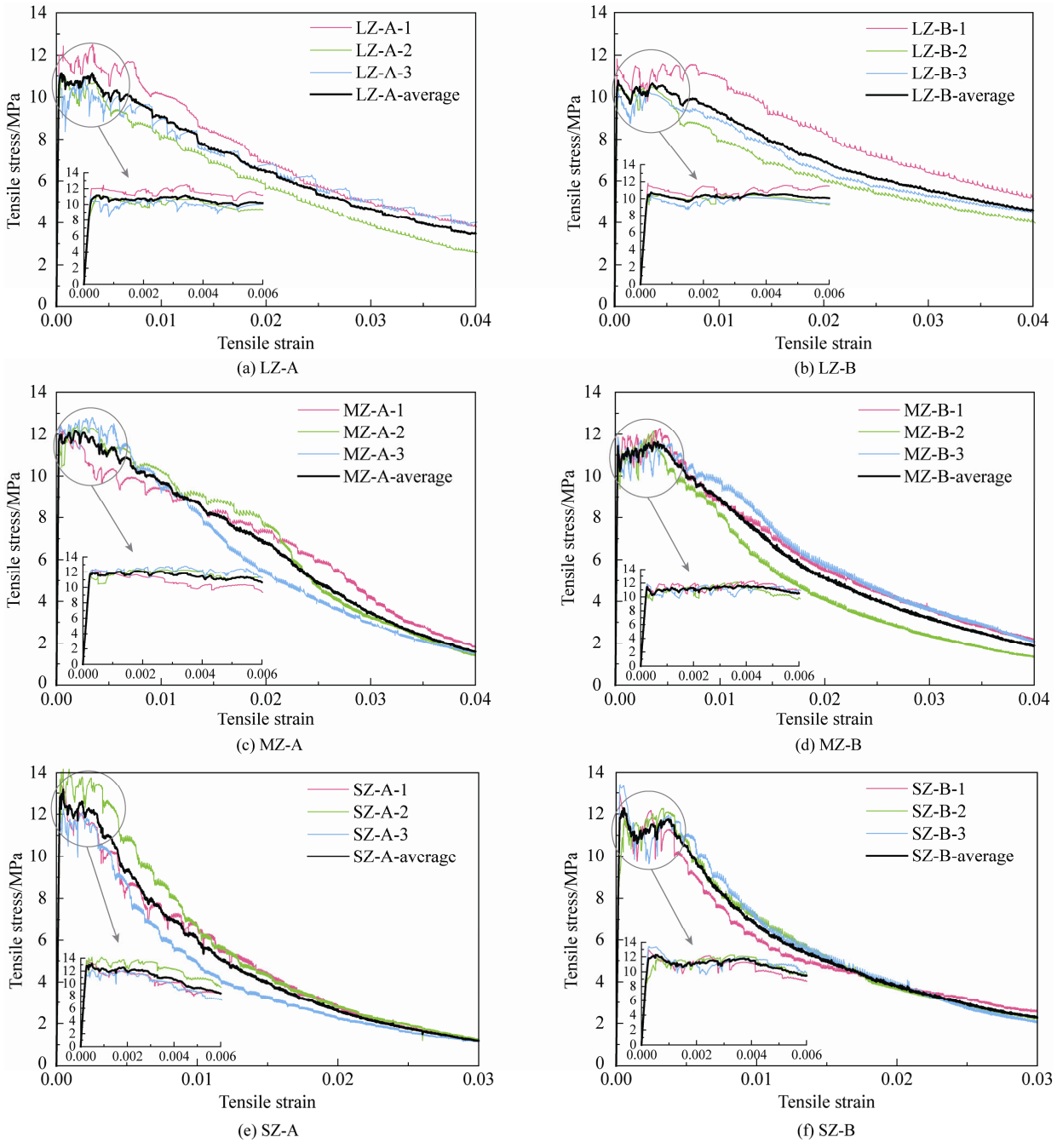


图2 直接拉伸试验的应力–应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of direct tensile test

应力–应变关系偏离直线。试件开裂后，大量钢纤维连接着裂缝，以其超高的抗拉强度，与 UHPC 基体优异的粘结性能，推动裂缝处钢纤维与 UHPC 基体间的应力传递，在应力传递范围外出现多条平行裂缝，这就是钢纤维的桥接作用[22]。随着应变的增加，裂缝变多变宽，应力波动变化，整体上保持上升的趋势，试件处于应变硬化阶段。每当有钢纤维与 UHPC 基体发生滑移时，可以听到“呲呲”的响声，应力出现波动。随着应变继续增加，当裂缝数量不再变化，某一裂缝处钢纤维与 UHPC 基体间应力传递的条件不再满足时，应力呈现不可逆的下降趋势，该裂缝宽度迅速增加，形成主裂缝，钢纤维不断被拔出，伴有“噌噌”的响声，试件处于应变软化阶段。

为了定量分析各组试件的抗拉强度和应变能力，选择直接拉伸试验曲线上线弹性段终点作为试件的初裂点，提取试件的初裂应力(σ_c)和初裂应变(ε_c)，选择开裂后应力波动变化达到的峰值作为试件的峰值点，提取试件的峰值应力(σ_p)和对应的峰值应变(ε_p)，初裂点和峰值点的选择如图 3 所示，表 3 为试件的拉伸特征值。

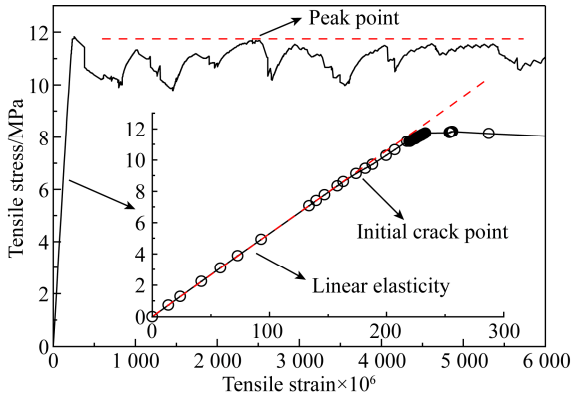


图 3　试件初裂点和峰值点的选择示意图

Fig. 3　Selection diagram for initial crack point and peak point of specimen

表 3　直接拉伸试验拉伸特征值

Table 3　Tensile characteristic values for direct tensile test

Sample No.	σ_c/MPa	$\varepsilon_c\times10^6$	σ_p/MPa	$\varepsilon_p\times10^6$
LZ-A	8.93	181	11.34	3 298
MZ-A	9.61	187	12.21	2 810
SZ-A	10.04	184	12.64	1 989
LZ-B	8.75	179	10.75	3 859
MZ-B	9.40	182	12.04	3 487
SZ-B	9.68	178	12.12	3 202

σ_c: Initial crack stress, ε_c: Initial crack strain, σ_p: Peak stress, ε_p: Peak strain.

2.2　试件厚度对抗拉强度的影响

图 4 为不同厚度试件平均初裂应力、平均峰值应力之间的关系。试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，A、B 两类 UHPC 的平均初裂应力分别提高了 12.4%、10.6%，平均峰值应力分别提高了 11.5%、12.8%。由此可见，随着试件厚度的减小，UHPC 抗拉强度略有提高，这一现象与 Frettlöhr 等[6]、Schultz-Cornelius 等[9]、Paschalis 等[15]、Nguyen 等[16]、Yoo 等[17]的研究结果是一致的。在试件浇筑过程中，具有良好流动性的 UHPC 与模具壁的摩擦产生不均匀的流速，由流速梯度产生的扭矩会影响钢纤维的分布，使钢纤维平行于流向排列，随着试件厚度的增加，流速梯度变得平缓，扭矩减小，钢纤维更倾向于随机分布[17]。试件受轴向拉力时，UHPC 基体和钢纤维共同承担轴拉力，钢纤维承担轴拉力的大小与钢纤维的取向有关，在较薄试件中，钢纤维平行于轴拉力方向的取向较好，承担的轴拉力略高，导致初裂应力和峰值应力略高，这一规律与 Abrishambaf 等[11–12]的研究结果一致。

如图 4 所示，A 类 UHPC 的初裂应力和峰值应力均略高于 B 类 UHPC，UHPC 的抗拉强度随着钢纤维长径比的增加而略有降低，对此有两种可能的原因，一是在试件厚度、钢纤维掺量和直径相同的情况下，钢纤维长度越长，单位体积内数量越少，UHPC 的抗拉强度略有降低[23–24]，二是较长钢纤维在 UHPC 搅拌过程中难以拌合均匀[25]。

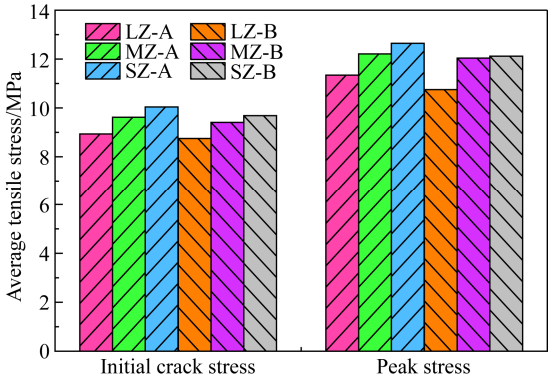


图 4　不同试件厚度对 UHPC 抗拉强度的影响

Fig. 4　Influence of different specimen thickness on tensile strength of UHPC

2.3　试件厚度对应变能力的影响

图 5 为不同厚度试件平均初裂应变、平均峰值应变之间的关系。各组试件的平均初裂应变都在 180×10^{-6} 左右，说明 UHPC 的初裂应变几乎不受试

件厚度的影响。随着试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，A、B 两类 UHPC 的平均峰值应变分别减少了 39.7%、17.0%。由此可见，随着试件厚度的减小，UHPC 的应变能力显著下降，这一现象与 Nguyen 等[8]的研究发现相对应。因为试件表面和内部都不可避免的存在一些缺陷，受到轴向拉力时，较薄试件穿透表面缺陷形成裂缝的概率更高，而穿透表面缺陷对应变软化的影响大于穿透内部缺陷，导致较薄试件的应变能力较弱[8]。

如图 5 所示，B 类 UHPC 试件的峰值应变明显高于 A 类 UHPC 试件，UHPC 的应变能力随着钢纤维长径比的增加而显著提高，这一规律和 Yoo 等[26]的研究结果一致。在试件厚度、钢纤维掺量和直径相同的情况下，长纤维比短纤维更能有效限制宏观裂缝的发展，从而提高 UHPC 的延性[26]。

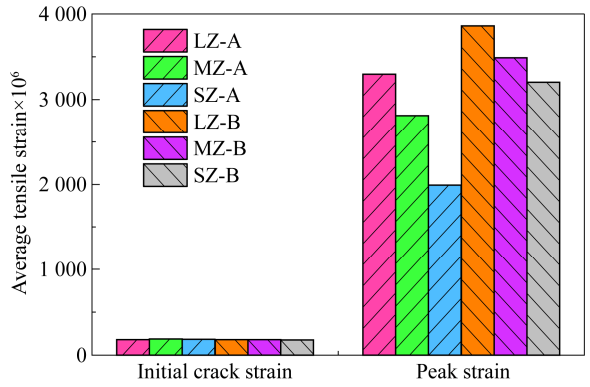


图 5 不同试件厚度对 UHPC 应变能力的影响

Fig. 5 Influence of different specimen thickness on strain capacity of UHPC

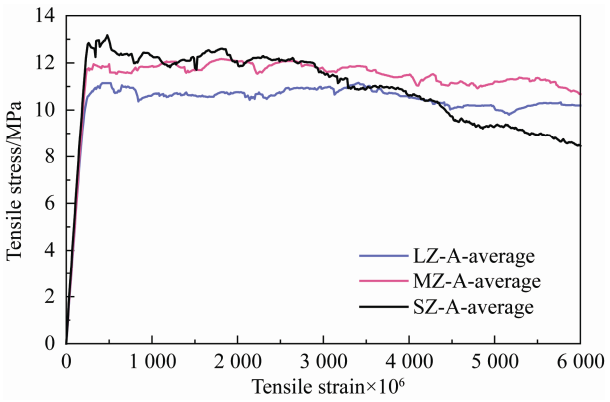
图 6 为各组试验的平均应力–应变曲线。从图 6 可以看出，A、B 两类 UHPC 试件表现出相同的变化规律。试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，平均应力–应变曲线的应变硬化段变短，应变软化速率增加。30 mm 厚试件的抗拉强度较高，但应变能力相对较弱。

各个 UHPC 试件的峰值应变均接近或高于 $2\,000\times10^{-6}$，与普通混凝土开裂就退出工作的受拉性能不同，UHPC 具有稳定的裂后抗拉强度，如图 6 所示，各组试件在 $2\,000\times10^{-6}$ 时的平均应力均在 10 MPa 以上，当普通钢筋屈服时，UHPC 仍能与其协同受拉，因此在 UHPC 结构设计和工程应用中需要考虑其抗拉性能。

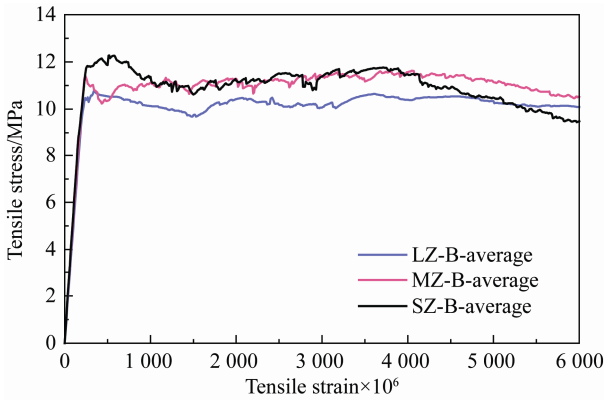
2.4 试件厚度对裂缝的影响

从裂缝逐渐发展的过程中可以看出试件应力–应变曲线变化的趋势。100 mm 厚试件的裂缝先出现在一侧，随着应变的增加，多条平行裂缝出现，裂缝从一侧逐渐向另一侧发展，但裂缝宽度增加缓慢，试件处于应变硬化阶段，随着应变继续增加，其中一条裂缝宽度迅速发展，形成主裂缝，其余裂缝宽度几乎不变，试件进入应变软化阶段。50 mm 和 30 mm 厚试件的裂缝发展过程则略有不同，裂缝在 4 个侧面同时出现，随着应变的增加，裂缝数量增加较快，宽度则缓慢增加，直到形成主裂缝。较厚试件的裂缝从一侧延展至另一侧，裂后应力相对较高，应变软化较慢，而较薄试件四面同时开裂，裂缝发展迅速，裂后应力下降较快。直接拉伸试件的断裂形态如图 7 所示。

测量每一级荷载下最宽的裂缝，绘制裂后应力–裂缝宽度曲线，如图 8 所示。所有试件裂后应力–裂缝宽度曲线变化趋势大致相同。为了定量分析不同厚度 UHPC 试件的裂缝发展过程，分别提取试件在 0.05、0.10、0.20、0.50、4.00 mm 裂缝宽度处的应力值，并统计试件的裂缝数量，汇总在表 4 中。



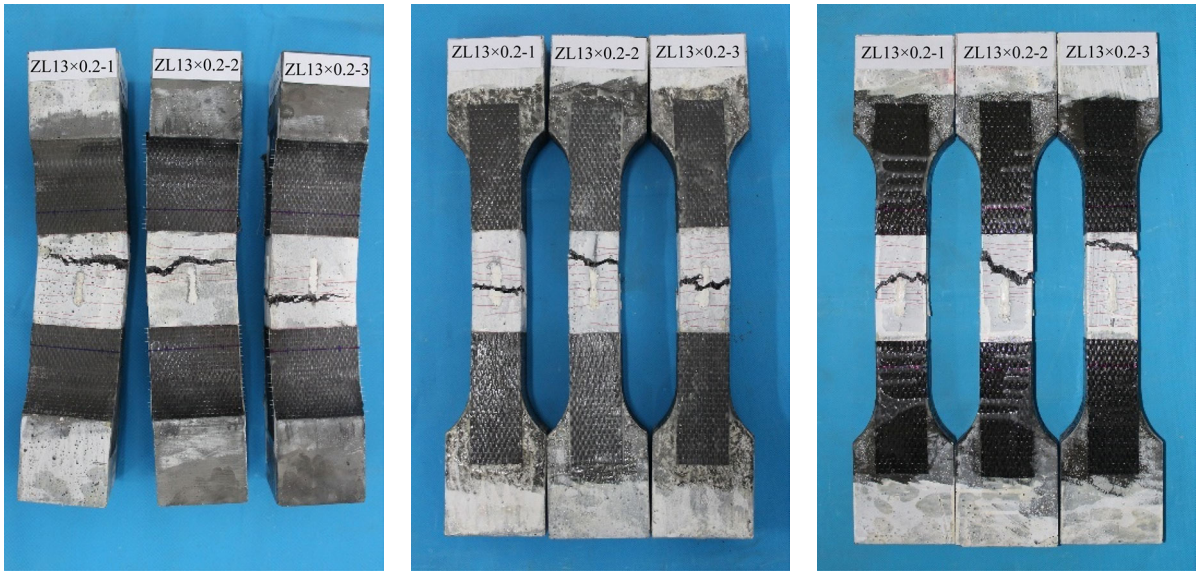
(a) Type A



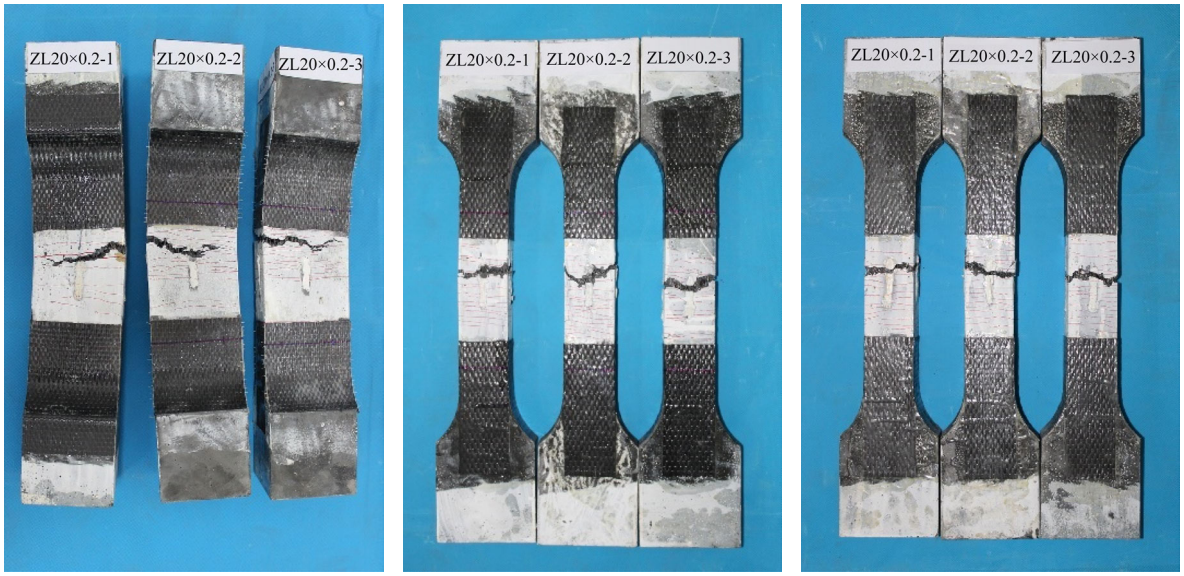
(b) Type B

图 6 平均应力–应变曲线

Fig. 6 Average stress-strain curves



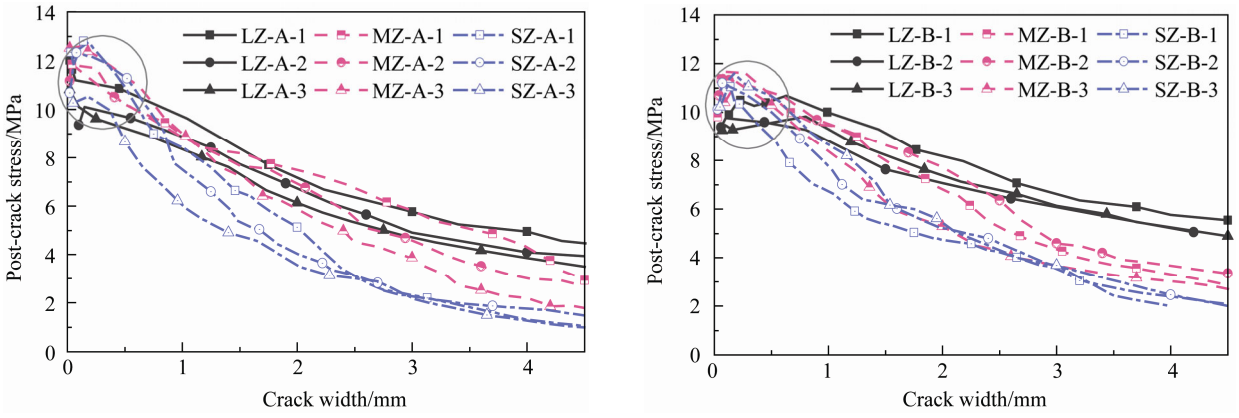
(a) LZ-A　(b) MZ-A　(c) SZ-A



(d) LZ-B　(e) MZ-B　(f) SZ-B

图 7　直接拉伸试件的断裂形态

Fig. 7　Fracture morphologies of direct tensile specimens



(a) Type A　(b) Type B

图 8　裂后应力–裂缝与宽度的关系曲线

Fig. 8　Curves of post-crack stress-crack *vs.* width

表 4 特定裂缝宽度下的平均应力值和平均裂缝数量
Table 4 Average stress values for specific crack widths and average number of cracks

Sample No.	Average post-crack stress/MPa					Average number of cracks
	0.05 mm	0.10 mm	0.20 mm	0.50 mm	4.00 mm	
LZ-A	10.47	10.22	10.31	9.90	4.30	7.3
MZ-A	12.02	12.00	11.77	10.60	3.17	10.3
SZ-A	11.26	11.72	11.77	10.31	1.44	12.7
LZ-B	9.51	9.71	9.81	9.86	5.42	11.7
MZ-B	10.56	11.19	11.37	10.60	3.33	15.7
SZ-B	10.53	11.00	10.91	9.88	2.28	18.7

主裂缝形成前，试件处于应变硬化阶段，随着应变的增加，裂缝数量明显增加，但宽度增加缓慢，说明 UHPC 试件通过增加裂缝数量来限制裂缝宽度的发展。如表 4 所示，试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，平均裂缝数量明显增加，反映了试件厚度对 UHPC 限制裂缝发展能力的影响，较薄试件限制裂缝发展的能力更强。这一现象和钢纤维的取向有关，钢纤维在平行于轴拉力方向的取向占优，UHPC 限制裂缝发展的能力更强，试件裂缝数量较多，和 Abrishambaf 等[11]的研究发现是一致的。B 类 UHPC 试件的裂缝数量较多，UHPC 限制裂缝发展的能力随钢纤维长径比的增加而略有提升，和 Yoo 等[26]的研究发现是一致的。

从图 8 和表 4 可以发现，在裂缝宽度不超过 0.2 mm 时，随着裂缝的发展，试件的裂后应力表现出先增加进而基本维持不变的趋势，展现了 UHPC 的应变硬化特性，随着试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，UHPC 试件的裂后应力略有增加，这一现象和 UHPC 试件的峰值应力随试件厚度的减小而略有增加是相对应的。B 类 UHPC 试件的裂后应力略低于 A 类 UHPC 试件，裂后应力随钢纤维长径比的增加而略有降低，这一现象和 UHPC 抗拉强度随钢纤维长径比增加而略有降低是相对应的。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG 3362—2018)》[27]中正常使用极限状态下钢筋混凝土和 B 类预应力混凝土构件的最大裂缝宽度限值的规定，一般环境中钢筋混凝土构件的最大裂缝宽度限值为 0.2 mm，而各个 UHPC 试件在裂缝宽度达到 0.2 mm 时的裂后应力均在 9 MPa 以上，对 UHPC 构件开裂截面的验算需要考虑其裂后性能的影响。

主裂缝形成后，裂缝数量不再变化，裂缝宽度迅速增加，裂后应力逐渐降低。如图 8 所示，当裂缝宽度超过 0.2 mm，随着试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，试件裂缝宽度发展速率增大，裂后应力降低的速率也相应增加，当裂缝宽度达到 4 mm 时，裂后应力随着试件厚度的减小而明显降低，如表 4 所示。说明裂缝变宽后，UHPC 试件裂后性能随着试件厚度的减小而降低，这与试件厚度对 UHPC 应变能力的影响是一致的。A 类 UHPC 试件裂后应力的下降速率较高，在裂缝宽度达到 4 mm 时，B 类 UHPC 试件的裂后应力明显高于 A 类 UHPC 试件，裂后应力随钢纤维长径比的增加而明显提高，这一规律与黄政宇等[28]的研究发现一致。

2.5 主裂缝宽度和平均拉伸应变的关系

法国 UHPC 规范 NF P18-710[20]规定了正常使用极限状态 UHPC 常规拉伸定律，其特征点参数根据法国 UHPC 材料标准 NF P18-470[29]附录 D 建议的试验确定，其中，局部峰值应变按式(1)计算：

$$\varepsilon_{\mathrm{p}}=\frac{w_{\mathrm{p}}}{L}+\frac{f_{\mathrm{e}}}{E_{\mathrm{m}}} \tag{1}$$

式中：f_{e}为 UHPC 弹性拉伸极限的特征强度，由四点弯曲试验得到；E_{m}为 UHPC 的弹性模量；w_{p}为三点弯曲试验得到的试验曲线上局部峰值对应的裂缝宽度；L 为特征长度，L=2h/3，h 是三点弯曲试件的截面高度。

由式(1)可以看出，UHPC 的应变由两部分组成，一是线弹性阶段的弹性应变，二是由主裂缝宽度引起的裂后应变。试件的主裂缝形成并发展在应变软化阶段，由图 8 可以看出，主裂缝的发展过程受试件厚度的影响，为此，通过拟合系数 γ_{t} 考虑试件厚度的影响，进而建立 UHPC 应变软化段拉伸应变拟合公式，如式(2)所示。

$$\varepsilon=\frac{w}{\gamma_{\mathrm{t}}L}+\frac{f_{\mathrm{t}}}{E} \tag{2}$$

式中：ε 为拟合应变值；w 为主裂缝宽度；L 为特征长度，取试件标距 150 mm；f_{t}为 UHPC 拉伸弹性极限强度，取表 3 中初裂应力(σ_{c})；E 为 UHPC 的弹性模量，取表 2 中试验值。

提取每一个 UHPC 试件分别在 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 mm 裂缝宽度附近的实测裂缝宽度值和相应的裂后应力值，并从图 2 中提取与裂后应力值对应的应变值，共提取 139 个数据点，建立数据库。以无量纲参数 γ_{t}(式 3)为纵坐标，以试件厚度的倒数 1/t 为横坐标，数据库的拟合系数分布如图 9 所示，拟合系数 γ_{t} 如式(4)所示。

$$\gamma_t=\frac{w_t}{L\left(\varepsilon_t-\dfrac{\sigma_c}{E}\right)} \tag{3}$$

式中：w_t 为数据库中实测裂缝宽度值；ε_t 为数据库中实测应变值；σ_c 为试件初裂应力，从表 3 中取值。

$$\gamma_t=4/t+0.75 \tag{4}$$

式中：t 为试件厚度，分别为 100、50、30 mm。

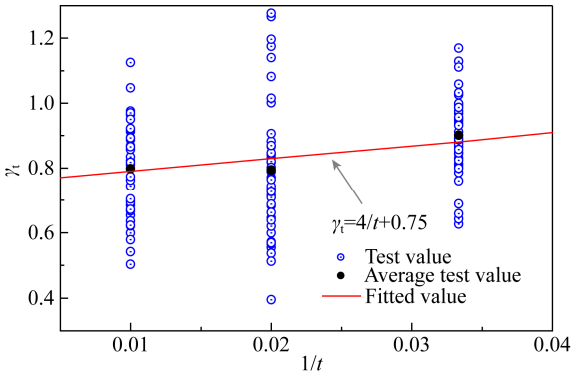


图 9　拟合系数分布图

Fig. 9　Fitting coefficient distribution diagram

每组试验的 3 条裂后应力–裂缝宽度曲线存在一定差异，对裂后应力取平均值，得到平均裂后应力–裂缝宽度曲线，按式(2)将主裂缝宽度转换成拉伸应变值，绘制平均裂后应力–拟合应变曲线，并与对应试验组的平均应力–应变曲线对比，如图 10 所示。各试验组的平均裂后应力–拟合应变曲线与平均应力–应变曲线的应变软化段吻合较好，说明 UHPC 试件的主裂缝发展过程与应变软化过程是相对应的，可以通过主裂缝宽度拟合得到试件的拉伸应变值。

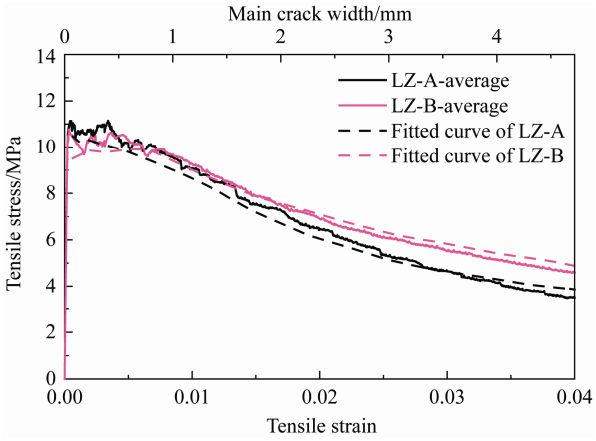
3　结论

通过直接拉伸试验从抗拉强度、应变能力、裂缝发展 3 个方面分析了试件厚度和钢纤维长径比对 UHPC 轴拉性能的影响，得到了以下结论：

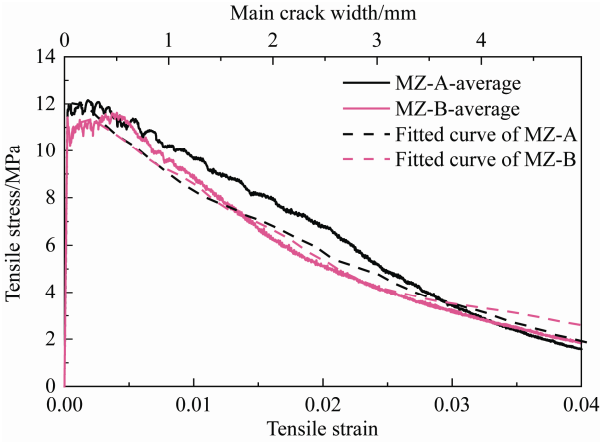
1) 随着试件厚度从 100 mm 减小到 30 mm，UHPC 的初裂应力和峰值应力均略有增加，抗拉强度略有提高，初裂应变几乎不变，峰值应变明显减小，应变能力显著降低，应变软化速率增加。

2) 在试件厚度、钢纤维掺量和直径均相同的情况下，UHPC 的抗拉强度随着钢纤维长度的增加而略有降低，应变能力则显著提高，长纤维比短纤维更能有效限制宏观裂缝的发展。

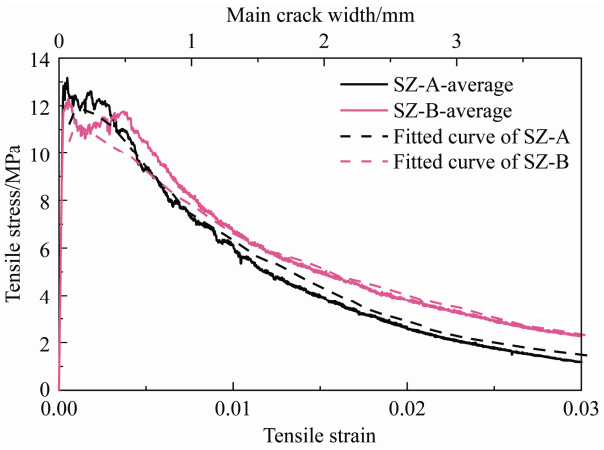
3) 较薄 UHPC 试件限制裂缝发展的能力更强，平均裂缝数量更多，当裂缝宽度不超过 0.2 mm 时，试件的裂后应力随裂缝宽度的增加先增加进而基本



(a) 100 mm



(b) 50 mm



(c) 30 mm

图 10　主裂缝发展过程和应变软化过程的对比

Fig. 10　Comparison of main crack development process and strain softening process

维持不变，UHPC 的裂后应力随着试件厚度的减小而略有增加。

4) 主裂缝形成后，试件的裂缝宽度发展速率和裂后应力下降速率随着试件厚度的减小而增大，较薄试件裂缝宽度发展较快，裂后应力下降较快，当裂缝宽度达到 4 mm 时，UHPC 的裂后应力随试件

厚度的减小而明显降低。由主裂缝宽度拟合得到拉伸应变值，绘制出平均裂后应力–拟合应变曲线，与对应试验组平均应力–应变曲线的应变软化段吻合较好。

参考文献:

[1] 2019 年度中国超高性能混凝土(UHPC)技术与应用发展报告[J]. 混凝土世界, 2020(2): 30–43.
CCPA-UHPC. Chin Concr (in Chinese), 2020(2): 30–43.

[2] 邵旭东, 曹君辉. 面向未来的高性能桥梁结构研发与应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 41–58.
SHAO Xudong, CAO Junhui. J Archit Civ Eng (in Chinese), 2017, 34(5): 41–58.

[3] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33–43.
SHAO Xudong, QIU Minghong, YAN Banfu, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 33–43.

[4] 刘建忠, 韩方玉, 周华新, 等. 超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 24–32.
LIU Jianzhong, HAN Fangyu, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 24–32.

[5] HASSAN A M T, JONES S W, MAHMUD G H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Constr Build Mater, 2012, 37: 874–882.

[6] FRETTLÖHR B, REINECK K H, REINHARDT H W. Size and shape effect of UHPFRC prisms tested under axial tension and bending[M]// High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6. Springer, Dordrecht, 2012: 365–372.

[7] GRAYBEAL B A, BABY F. Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete[J]. Aci Mater J, 2013, 110(2): 177–186.

[8] NGUYEN D L, RYU G S, KOH K T, et al. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. Compos Part B: Engineering, 2014, 58: 279–292.

[9] SCHULTZ-CORNELIUS M, PAHN M. Investigations on the size effect of thin structural elements made of UHPC[C]//Proceedings of the 4th international symposium on ultra-high performance concrete and high performance construction materials, Kassel University, Kassel, Germany, 9th–11th March 2016, Book of Abstracts S. 2016: 71–72.

[10] 杜任远, 陈宝春, 沈秀将. 不同方法测试的超高性能混凝土抗拉强度[J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 483–486,520.
DU Renyuan, CHEN Baochun, SHEN Xiujiang. Mater Rev (in Chinese), 2016, 30(S2): 483–486,520.

[11] ABRISHAMBAF A, PIMENTEL M, NUNES S. Influence of fibre orientation on the tensile behaviour of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites[J]. Cem Concr Res, 2017, 97: 28–40.

[12] ABRISHAMBAF A, PIMENTEL M, NUNES S. The effect of fibre orientation on the uniaxial tensile response of UHPFRC: experimental evaluation and analytical modelling[M]//High tech concrete: Where technology and engineering meet. Springer, Cham, 2018: 173–181.

[13] 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.
LI Fangyuan. Influential research on the steel fiber properties on the tensile properties of UHPC (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2019.

[14] ZHOU Z, QIAO P. Direct tension test for characterization of tensile behavior of Ultra-High performance concrete[J]. J Test Evaluation, 2020, 48(4).

[15] PASCHALIS S A, LAMPROPOULOS A P. Size effect on the flexural performance of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC)[C]//HPFRCC-7 7th RILEM Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Stuttgart. 2015: 1–3.

[16] NGUYEN D L, KIM D J, RYU G S, et al. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete[J]. Compos Part B: Engineering, 2013, 45(1): 1104–1116.

[17] YOO D Y, BANTHIA N, KANG S T, et al. Size effect in ultra-high-performance concrete beams[J]. Eng Fracture Mech, 2016, 157: 86–106.

[18] 杨简, 陈宝春, 沈秀将, 等. UHPC 单轴拉伸试验狗骨试件优化设计[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 37–46,55.
YANG Jian, CHEN Baochun, SHEN Xiujiang, et al. Eng Mech (in Chinese), 2018, 35(10): 37–46,55.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 31387–2015 Reactive powder concrete[S]. Beijing, China, 2015.

[20] NF P18-710 National addition to Eurocode 2 — Design of concrete structures: specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)[S]. France: AFNOR, 2016.

[21] WILLE K, KIM D J, NAAMAN A E. Strain-hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents[J]. Mater Struct, 2011, 44(3): 583–598.

[22] 张哲. 钢—配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHANG Zhe. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of OSD and reinforced UHPC layer (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2016.

[23] 宋焱. 级配纤维超高性能混凝土抗拉性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
SONG Yan. The research on the tensile performance of the ultra-high-performance concrete reinforced by grading-fiber (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2006.

[24] 陈宝春, 林毅焌, 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. J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed, in Chinese), 2020, 48(1): 58–68.

[25] 高绪明. 钢纤维对超高性能混凝土性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
GAO Xuming. Research on the performance of UHPC with steel fiber (in Chinese, dissertation). Changsha: Hunan University, 2013.

[26] YOO D Y, KIM S, PARK G J, et al. Effects of fiber shape, aspect ratio, and volume fraction on flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced cement composites[J]. Compos Struct, 2017, 174: 375–388.

[27] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
JTG 3362-2018 Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing, China, 2018 (in Chinese).

[28] 黄政宇, 吴峥. 钢纤维对超高性能混凝土裂后性能的影响[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 84–90.
HUANG Zhengyu, WU Zheng. Highway Eng (in Chinese), 2018, 43(2): 84–90.

[29] NF P18-470 Concrete — Ultra-high performance fibre-reinforced concrete — Specifications, performance, production and conformity[S]. France: AFNOR, 2016.