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.0454-5648.20200196

钢管约束超高性能混凝土受压本构模型

卢秋如，徐礼华，池 寅，余 敏，杨英欣

(武汉大学土木建筑工程学院，武汉 430070)

摘 要：为了研究钢管约束超高性能混凝土(UHPC)本构模型，对 42 根约束 UHPC 试件和 3 根无约束 UHPC 试件进行了轴心受压试验，考察了 UHPC 受约束后的破坏形态和应力-应变全曲线，分析了钢纤维掺量与长径比、聚丙烯纤维掺量与长径比以及钢管厚度对应力-应变全曲线的影响规律。结果表明：钢管厚度为主要影响因素，可显著提高 UHPC 峰值应力与应变；混杂纤维能提高约束 UHPC 峰值应力与应变，其中，钢纤维掺量的影响较为明显，在聚丙烯纤维掺量适宜时，随钢纤维掺量增加，约束 UHPC 峰值应力增加，峰值应变先减小后增加。基于实测的约束 UHPC 应力-应变典型曲线，建立了相应的本构模型。

关键词：超高性能混凝土；约束；钢管；纤维；本构模型
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1201–11
网络出版时间：2020–06–23



Compressive Constitutive Model of Ultra-high Performance Concrete Confined by Steel Tube

LU Qiuru, *XU Lihua*, *CHI Yin*, *YU Min*, *YANG Yingxin*
(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To investigate the constitutive model of ultra-high performance concrete confined by steel tube, axial compressive experiments were conducted on 42 confined UHPC and 3 unconfined UHPC specimens. Failure modes and stress-strain curves were obtained. Effects of steel fiber volume fraction and aspect ratio, polypropylene fiber volume fraction and aspect ratio and steel tube thickness on the stress-strain curves were analyzed. The results show that steel tube thickness is a main affecting factor. The peak stress and corresponding strain increase with the increase in the thickness. Fibers are beneficial to the improvement in the peak stress and strain. Steel fiber volume fraction has an obvious effect on the peak stress and strain. At a proper volume fraction of polypropylene fiber, the peak stress increases and the peak strain first decreases and then increases with increasing steel fiber volume fraction. In addition, the corresponding constitutive models were also proposed based on the typical stress-strain curves of confined UHPC.

Keywords: ultra-high performance concrete; confinement; steel tube; fiber; constitutive model

近年来，各种超大、超高、超长型混凝土建筑物的建造量不断增加，传统的混凝土材料已难以满足建筑和结构要求，超高性能混凝土(UHPC)作为一种新型可持续、高性能混凝土材料的优势日益凸显。UHPC 具有超高强、高韧性和优异耐久性等优点[1]，其原材料充分利用工业生产中的副产品，减小能源消耗，且对环境的破坏与污染少。自 20 世纪末问世以来[2]，受到国内外土木工程界广泛关注。

目前，国内外学者们对 UHPC 制备与力学行为进行了大量研究[3–6]，发现 UHPC 虽具有很高的强度，但其延性性能较差。因此，有必要对 UHPC 施加外部约束以增强延性，并进一步提高强度与韧性，使 UHPC 能够适应更恶劣的服役环境。外部约束具有多种形式[7–9]，其中圆形钢管是一种行之有效的约束形式。圆形钢管具有很好的延性，且能向 UHPC 提供均匀的约束。

收稿日期：2020–03–25。　修订日期：2020–05–10。
基金项目：国家自然科学基金(51738011)。
第一作者：卢秋如(1993—)，女，博士研究生。
通信作者：徐礼华(1962—)，女，教授。

Received date: 2020–03–25.　**Revised date:** 2020–05–10.
First author: LU Qiuru (1993–), female, Doctorial candidate.
E-mail: luqiuru09@whu.edu.cn
Correspondent author: XU Lihua (1962–), female, Professor.
E-mail: xulihuad@163.com

另外，向 UHPC 加入纤维亦能提高其延性性能，尤其是多尺度的混杂纤维[10–11]。必须指出的是，UHPC 水泥用量大，早期收缩较为严重，且密实性好，高温下容易发生爆裂，采用聚丙烯纤维可有效改善收缩与高温爆裂现象[12]。同时，聚丙烯纤维可在混凝土内形成“次级加筋网”，有效增强混凝土抗拉强度与断裂韧性。

因此，本工作通过钢管约束钢-聚丙烯混杂纤维超高性能混凝土轴心受压试验，获取约束 UHPC 应力-应变曲线，分析应力-应变曲线特征，总结典型曲线，建立相应的受压本构模型，为工程设计提供参考。

1 实验

1.1 方案设计

1.1.1 考察因素与水平 根据课题组前期研究成果[13]，主要考察因素为钢纤维体积掺量与长径比、聚丙烯纤维体积掺量与长径比、钢管厚度。纤维参数均选取 3 个水平，钢纤维(SF)体积掺量为 1.0%、1.5%和 2.0%，长径比为 30 (SA)、60 (SB)和 80 (SC)；聚丙烯纤维(PF)体积掺量为 0.1%、0.15%和 0.20%，长径比为 167 (PA)、280 (PB)和 396 (PC)。钢管厚度选取 5 个水平，分别为 3.5、5.5、8.0、10.0 mm 和 12.0 mm。

1.1.2 试件参数及数量 按照拉丁超立方抽样法[14]，选取了 3 个样本点(L1、L2 和 L3)，再基于样本点进行全排列，共设计了 42 根圆钢管超高性能混凝土试件(39 根含钢-聚丙烯混杂纤维，3 根不含纤维)，以及 3 根无约束 UHPC 试件。约束和无约束试件尺寸相同：外直径为 108 mm，高度为 324 mm。试件具体参数见表 1。

1.1.3 原材料与配合比 UHPC 的原材料为：52.5 级硅酸盐水泥、SiO_2 含量大于 90%的硅灰、I 级粉煤灰、优质中砂(细度模数为 2.6)、聚羧酸系减水剂(减水率≥25%)，以上材料均由中建商品混凝土有限公司湖北武汉武东搅拌站提供。UHPC 基准配合比为，水泥、硅灰和粉煤灰之比为 0.8:0.05:0.15，水胶比为 0.18，砂胶比为 1.22，以上均为质量比。此外，减水剂掺量为胶凝材料质量的 3%。水泥、硅灰和粉煤灰的化学组分及含量如表 2 所示。钢纤维与聚丙烯纤维主要物理力学参数如表 3 所示。

1.1.4 试件制作、浇筑与养护 UHPC 制作过程如下：首先准确称量各种原材料，然后向搅拌机中加入干料，即水泥、硅灰、粉煤灰和中砂，预先搅拌 5 min 使其充分均匀。与此同时，将减水剂和水混合在一起，再加入到干料中搅拌 8 min。此时，素 UHPC 制备完成。对于掺入纤维的试件则继续均匀地加入钢纤维和预先分散过的聚丙烯纤维，进一步

表 1 圆钢管超高性能混凝土试件参数

Table 1 Details of UHPC filled steel tube specimens

Sample No.	t/mm	V_{SF}/%	l/d_{SF}	V_{PF}/%	l/d_{PF}	f_c/MPa
L1-SB15PB20		1.5	60	0.20	280	98.5
L1-3.5-SB15PB20	3.5	1.5	60	0.20	280	98.5
L1-5.5-SB15PB20	5.5	1.5	60	0.20	280	98.5
L1-8-SB15PB20	8.0	1.5	60	0.20	280	98.5
L1-10-SB15PB20	10.0	1.5	60	0.20	280	98.5
L1-12-SB15PB20	12.0	1.5	60	0.20	280	98.5
L1-8-SB10PB20	8.0	1.0	60	0.20	280	97.3
L1-8-SB20PB20	8.0	2.0	60	0.20	280	117.0
L1-8-SB15PB10	8.0	1.5	60	0.10	280	97.4
L1-8-SB15PB15	8.0	1.5	60	0.15	280	97.2
L1-8-SA15PB20	8.0	1.5	30	0.20	280	91.9
L1-8-SC15PB20	8.0	1.5	80	0.20	280	92.6
L1-8-SB15PA20	8.0	1.5	60	0.20	167	91.6
L1-8-SB15PC20	8.0	1.5	60	0.20	396	90.0
L1-8-O	8.0					96.1
L2-SA20PC15		2.0	30	0.15	396	108.8
L2-3.5-SA20PC15	3.5	2.0	30	0.15	396	108.8
L2-5.5-SA20PC15	5.5	2.0	30	0.15	396	108.8
L2-8-SA20PC15	8.0	2.0	30	0.15	396	108.8
L2-10-SA20PC15	10.0	2.0	30	0.15	396	108.8
L2-12-SA20PC15	12.0	2.0	30	0.15	396	108.8
L2-5.5-SA10PC15	5.5	1.0	30	0.15	396	101.3
L2-5.5-SA15PC15	5.5	1.5	30	0.15	396	105.0
L2-5.5-SA20PC10	5.5	2.0	30	0.10	396	114.4
L2-5.5-SA20PC20	5.5	2.0	30	0.20	396	108.0
L2-5.5-SB20PC15	5.5	2.0	60	0.15	396	127.9
L2-5.5-SC20PC15	5.5	2.0	80	0.15	396	111.8
L2-5.5-SA20PA15	5.5	2.0	30	0.15	167	108.7
L2-5.5-SA20PB15	5.5	2.0	30	0.15	280	116.8
L2-5.5-O	5.5					70.4
L3-SC10PA10		1.0	80	0.10	167	90.3
L3-3.5-SC10PA10	3.5	1.0	80	0.10	167	90.3
L3-5.5-SC10PA10	5.5	1.0	80	0.10	167	90.3
L3-8-SC10PA10	8.0	1.0	80	0.10	167	90.3
L3-10-SC10PA10	10.0	1.0	80	0.10	167	90.3
L3-12-SC10PA10	12.0	1.0	80	0.10	167	90.3
L3-10-SC15PA10	10.0	1.5	80	0.10	167	103.1
L3-10-SC20PA10	10.0	2.0	80	0.10	167	113.1
L3-10-SC10PA15	10.0	1.0	80	0.15	167	89.7
L3-10-SC10PA20	10.0	1.0	80	0.20	167	95.9
L3-10-SA10PA10	10.0	1.0	30	0.10	167	80.0
L3-10-SB10PA10	10.0	1.0	60	0.10	167	93.7
L3-10-SC10PB10	10.0	1.0	80	0.10	280	97.3
L3-10-SC10PC10	10.0	1.0	80	0.10	396	79.8
L3-10-O	10.0					366.2

t is thickness of steel tube; V_{SF} and V_{PF} are dosage of steel fiber (SF) and polypropylene fiber (PF); l/d_{SF} and l/d_{PF} are length/diameter ratio of steel fiber and PP fiber; f_c is strength of UHPC; f_y is yield stress of steel.

表 2　胶凝材料化学组分及含量

Table 2　Chemical compositions and contents of binder materials　　*w*/%

Composition	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	P_2O_5	CaO	K_2O	MnO	ZnO	SrO
Cement	0.079	2.140	4.500	19.580	3.060	3.119	0.128	64.940	0.750	0.127	0.024	0.148
Silica fume	0.068	0.224	0.354	92.870	1.260	0.113	0.110	0.213	0.332	0.008	0.019	0.005
Fly ash	0.552	0.575	30.630	48.740	0.706	2.611	0.247	2.440	1.250	0.016	0.013	0.060

w is mass fraction.

表 3　钢纤维与聚丙烯纤维的主要参数

Table 3　Major properties of steel fiber and polypropylene fiber

Fiber	Diameter/mm	Length/mm	Density/(g·cm^{-3})	Tensile strength/MPa	Feature
SF	0.200	6/12/16	7.80	>2 500	Straight
PF	0.048	8/13.5/19	0.91	>400	Monofilament

搅拌 2 min。通过掺入适量减水剂和严格控制搅拌流程，可保证纤维不结团、不成束，进而确保 UHPC 力学性能。

浇筑前，将塑料模具内部擦拭干净，并涂抹脱模剂。浇筑时，浇筑方向平行于模具横截面，分两次均匀浇入。然后置于振动台振捣 1 min，用抹刀将试块表面抹平。浇筑完毕后，将试件置于试验室内 24 h，再进行脱模。最后，将 UHPC 试块移入标准养护室养护 28 d。

1.2　UHPC 轴心受压试验

1.2.1　轴压强度　　依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[15]规范，UHPC 轴压强度试验采用 100 mm×100 mm×300 mm 标准棱柱体试块，加载速度为 12 kN/s。试验在 YAW- 3000W 型微机控制电液伺服压力试验机上进行，加载过程及数据采集均由计算机自动完成。

1.2.2　应力-应变全曲线　　无约束 UHPC 试件的应力-应变全曲线在 INSTRON 1346 电液伺服刚性试验机进行。并在试件四周分别安装了 2 个垂直向 5 mm 位移传感器和 2 个水平向 2.5 mm 位移传感器来测量试件的轴向变形和横向变形。加载前会对试件反复预压 3 次并卸载至零，预压荷载为 200 kN，加卸载速度为 10 kN/s，充分保证试件受压均匀。正式加载采用位移控制方式，加载速度为 1.0 μm/s。

1.3　钢管拉伸试验

钢管采用 Q420 无缝钢管，高度为 324 mm，外径为 108 mm。根据《金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)[16]，对钢管截取 3 片相同尺寸的标准骨头型试样，并在 CMT5305 万能试验机上进行钢材单轴拉伸试验。试验采用位移加载方式，加载速率为 0.5 mm/min，试件屈服后，逐渐加快加载速率至 1 mm/min。钢材的性能如图 1 和表 4 所示。

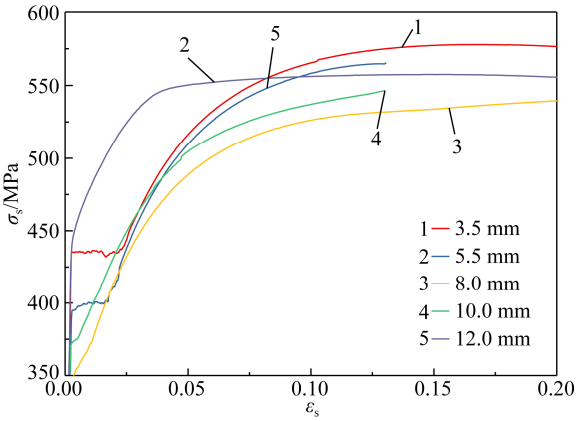


图 1　钢材拉伸应力-应变试验曲线

Fig. 1　Tensile stress-strain experimental curves of steel

表 4　钢材力学性能指标

Table 4　Mechanical properties of Q420 type steel

t/mm	E_s/GPa	v_s	f_y/MPa	f_u/MPa
3.5	176.4	0.28	420.5	569.3
5.5	181.0	0.33	383.1	548.5
8.0	176.5	0.29	351.0	531.8
10.0	193.1	0.30	366.2	531.8
12.0	216.3	0.31	430.0	553.7

E_s is elastic modulus; v_s is Poisson ratio; f_u is ultimate strength.

1.4　约束 UHPC 轴心受压试验

UHPC 搅拌流程如前所述，将新拌 UHPC 分层灌入钢管后，放置在振动台上振捣 1 min，再用抹刀将试件表面抹平，最后用塑料袋密封试件上端以保证水分不挥发，防止 UHPC 干燥收缩。试件置于实验室内自然养护 28 d 后，UHPC 基本无收缩，将试件上端打磨磨平。钢管 UHPC 试件表明平整，钢管与 UHPC 紧密接触。

约束UHPC轴心受压试验在YAW-3000W型微机控制电液伺服压力试验机上进行。轴向荷载值直接根据试验机配套的计算机采集得到。钢管的应变通过布置4个间隔90°的矩形应变片测定，试验机加载端与横梁的位移通过在试验机上下端分别布置4个位移计测量，位移计量程为50 mm，精度为0.001 mm。以上数据均通过DH3816N静态应变测试分析系统采集得到，频率为1次/s。

加载前对所有试件进行了预加载，将荷载从0加至200 kN，观察上下端位移计读数之差与钢管轴向应变是否一致，若误差小于10%，则认为试件已对中，可进行正式加载；若误差大于10%，则调整试件位置再进行预加载，直到试件对中。正式加载时，先采用力控制加载方式，加载速率为3 kN/s，直到荷载达到短柱极限承载力的80%左右时，改变为位移控制加载方式，加载速率为0.5 mm/min。当轴向位移达到45 mm时，停止加载。

2 约束UHPC轴心受压应力–应变全曲线分析

2.1 约束UHPC破坏形态

UHPC受到圆钢管约束后，其破坏形态主要是斜剪破坏与挤压流动，如图2所示。当钢管厚度小于等于3.5 mm时，钢管对UHPC约束作用小，UHPC内部将形成剪切斜裂缝贯穿试件，并将试件分割为上下两个部分，如图2a所示。剪切破坏面具有明显的滑移痕迹，剪切裂缝处的钢纤维被拔出。

当钢管厚度介于3.5 mm和8.0 mm之间时，UHPC仍会发生斜剪破坏，但剪切裂缝的宽度或长度减小，如图2b所示。此外，在破坏试件上端观察到了UHPC鼓曲压碎的现象，分析其原因是上端没有焊接钢盖板，其约束作用小于下端对UHPC的约束作用，而且UHPC上端的密实度会由于新拌混凝土沉降而减小，造成其薄弱界面增多。若钢管厚度较大(如厚度为8.0 mm)，UHPC上端鼓曲压碎的现象会大大减弱。



(a) $t \leqslant 3.5$ mm (b) $t = 3.5$–8.0 mm (c) $t \geqslant 8.0$ mm

图2 约束UHPC破坏形态

Fig. 2 Failure modes of confined UHPC

当钢管厚度大于8.0 mm时，钢管对UHPC的约束作用增大，提高了UHPC的延性。如图2c所示。试件有微弱的膨胀，其表面存在几条微裂纹。UHPC并未发生强度破坏，此时，根据混凝土三轴受压破坏形态[17]可将其破坏形态定义为挤压流动。

综上，钢管厚度为UHPC破坏形态的主要影响因素，纤维并不能改变破坏形态。

2.2 约束UHPC轴心受压应力-应变曲线

假设钢管为单轴受力状态，钢管与UHPC之间无相对滑移，加载面始终保持平面。此时，钢管承担的轴向荷载可根据钢材单轴拉伸应力-应变关系模型计算得到。将总荷载减去钢管承担的荷载再除以UHPC的横截面面积即可得到UHPC的应力。约束UHPC部分轴心受压应力-应变曲线如图3所示。纤维主要影响曲线峰后延性，钢管厚度对曲线形状、峰值应力与应变的影响显著。

2.2.1　峰值应力影响因素分析

(1) 钢纤维的影响

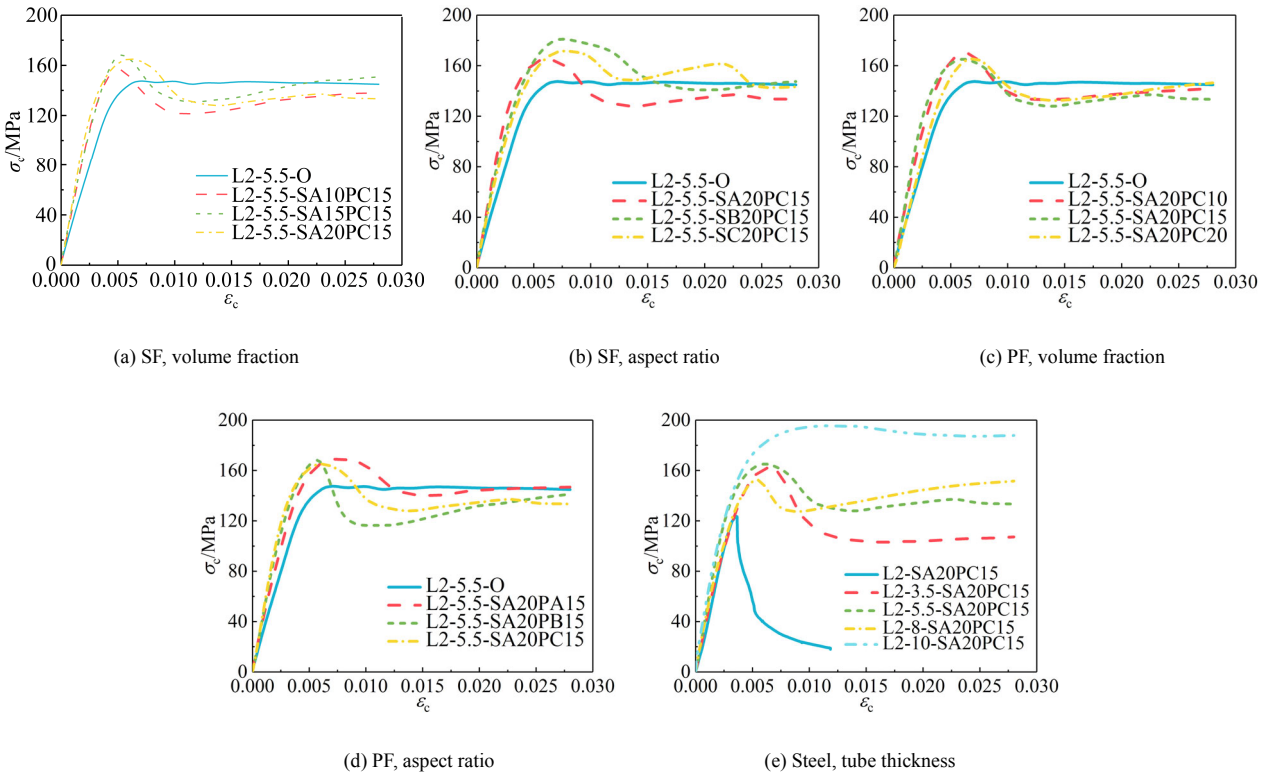
如图 4a 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：钢纤维掺量依次为 1.0%、1.5%、2.0%时，L1 系列约束 UHPC 峰值应力相应地增加了 12.7%、8.9%、5.5%；L2 系列峰值应力相应地增加了 6.5%、14.3%、12.2%；L3 系列峰值应力相应地增加了 6.3%、10.1%、22.4%。Hoang 等[18]研究了钢纤维掺量对钢管约束 UHPC 荷载-应变曲线的影响，发现在钢管厚度较小时，随钢纤维掺量从 1.0%增加至 2.0%，极限荷载增加。而结果有所不同，L1 和 L2 系列峰值应力先增加后减小，L3 系列峰值应力一直增加，其原因是掺入了钢-聚丙烯混杂纤维，当聚丙烯纤维掺量高且钢纤维掺量也较高时，纤维容易结团而对超高性能混凝土造成不利的影响。3 个系列中加入的聚丙烯纤维掺量分别为 0.20%、0.15%和 0.10%，因此 L1 系列在钢纤维掺量为 1.0%时峰值应力最大，L2 系列在钢纤维掺量为 1.5%时峰值应力最大，L3 系列在钢纤维掺量为 2.0%时峰值应力最大。

如图 4b 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：钢纤维长径比依次为 30、60、80 时，L1 系列约束 UHPC 峰值应力相应地增加了 7.3%、8.9%、2.1%；L2 系列峰值应力相应地增加了 12.2%、23.0%、16.7%；L3 系列峰值应力相应地增加了–2.9%、5.9%、6.3%。与钢纤维掺量相比，长径比对峰值应力的影响较小；在钢纤维掺量较大时，长径比的影响才比较明显。此外，随钢纤维长径比增加，峰值应力一般先增加后减小，钢纤维最佳长径比为 60。

(2) 聚丙烯纤维的影响

如图 4c 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：聚丙烯纤维掺量依次为 0.10%、0.15%、0.20%时，L1 系列约束 UHPC 峰值应力相应地增加了 7.9%、4.7%、8.9%；L2 系列峰值应力相应地增加了 15.6%、12.2%、12.5%；L3 系列峰值应力相应地增加了 6.3%、18.3%、15.9%。总体上，聚丙烯纤维掺量对峰值应力的影响很小。

如图 4d 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：聚丙烯纤维长径比依次为 167、280、396 时，L1 系列约束 UHPC 峰值应力相应地增加了 7.7%、8.9%、–0.5%；L2 系列峰值应力相应地增加了 14.9%、14.3%、12.2%；L3 系列峰值应力相应地增加了 6.3%、–2.3%、–1.7%。随聚丙烯纤维长径比增加，峰值应力先增加后减小，聚丙烯纤维最佳长径比为 167。

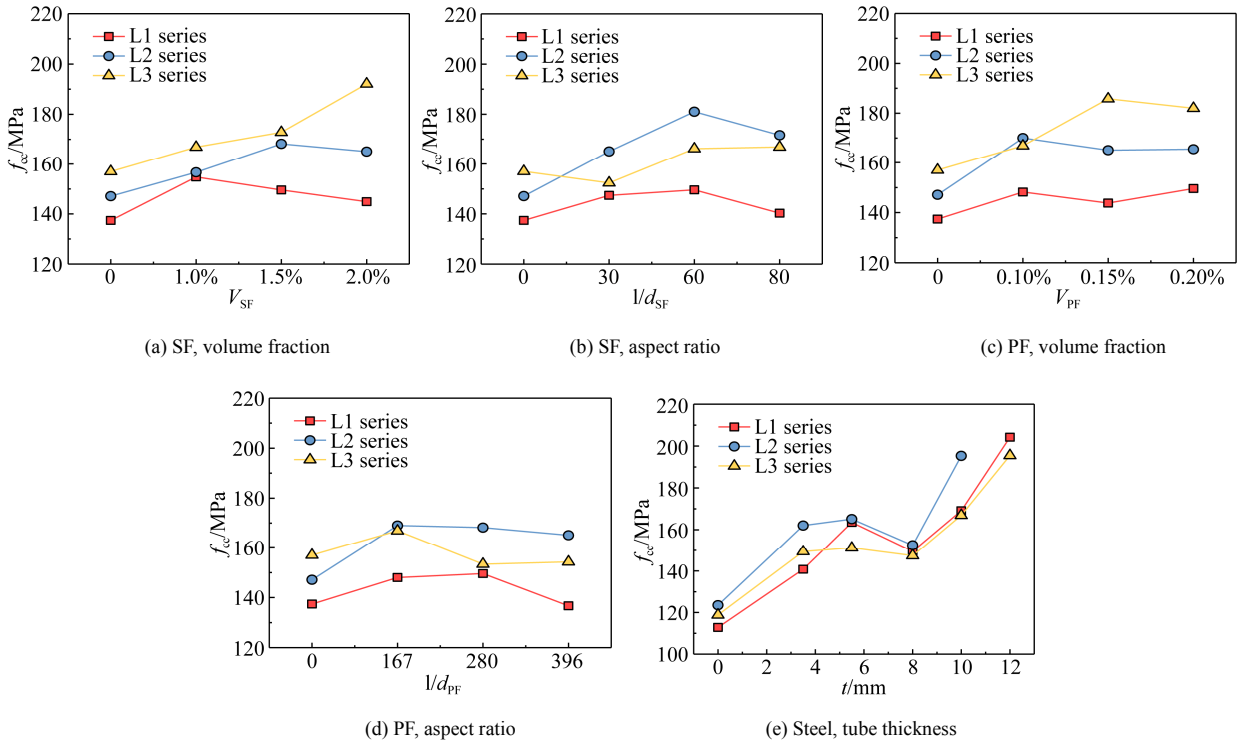


(a) SF, volume fraction　(b) SF, aspect ratio　(c) PF, volume fraction

(d) PF, aspect ratio　(e) Steel, tube thickness

图 3　纤维与钢管厚度对 UHPC 应力-应变曲线影响

Fig. 3　Effect of fibers and steel tube thickness on stress-strain curves of UHPC



(a) SF, volume fraction (b) SF, aspect ratio (c) PF, volume fraction

(d) PF, aspect ratio (e) Steel, tube thickness

图 4 纤维与钢管厚度对约束 UHPC 峰值应力影响

Fig. 4 Effect of fibers and steel tube thickness on peak stress of confined UHPC

(3) 钢管厚度的影响

如图 4e 所示，随钢管厚度增加，约束 UHPC 峰值应力增加。具体来说，与无约束 UHPC 相比：钢管厚度依次为 3.5、5.5、8.0、10.0、12.0 mm 时，L1 系列约束 UHPC 峰值应力相应地增加了 24.8%、44.9%、32.6%、49.9%、81.0%；L2 系列峰值应力相应地增加了 31.2%、33.7%、23.5%、58.1%；L3 系列峰值应力相应地增加了 25.8%、27.3%、24.1%、40.5%、64.6%。与纤维参数相比，钢管厚度对峰值应力的影响显著。此外，钢管厚度≤8.0 mm 时，峰值应力的增幅相对较小。

2.2.2 峰值应变影响因素分析

(1) 钢纤维的影响

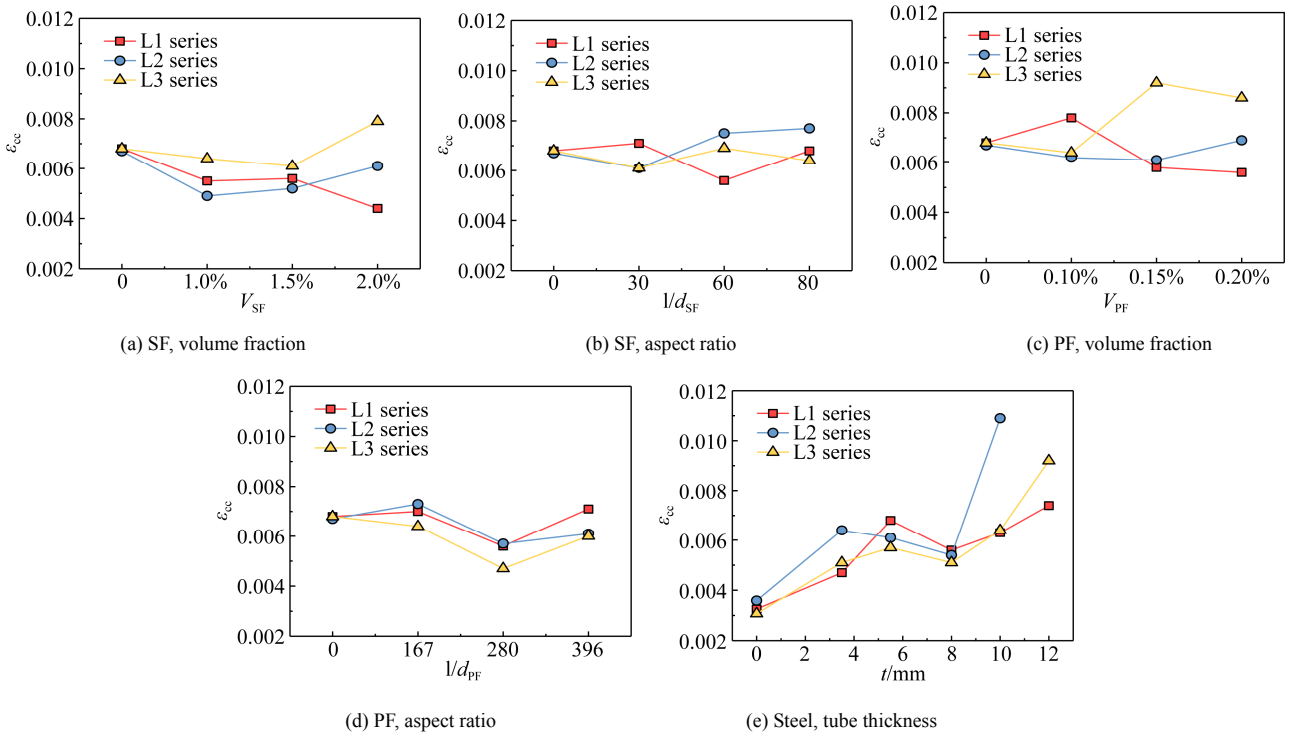
如图 5a 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：钢纤维掺量依次为 1.0%、1.5%、2.0%时，L1 系列约束 UHPC 峰值应变相应地增加了–19.1%、–17.6%、–35.3%；L2 系列峰值应变相应地增加了–26.9%、–22.4%、–9.0%；L3 系列峰值应变相应地增加了–5.9%、–10.3%、16.2%。L1 系列中聚丙烯纤维掺量大，故峰值应变随钢纤维掺量增加而减小。L2 和 L3 系列峰值应变随钢纤维掺量增加均先减小后增加。

如图 5b 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：钢纤维长径比依次为 30、60、80 时，L1 系列约束 UHPC 峰值应变相应地增加了 4.4%、–17.6%、0；L2 系列峰值应变相应地增加了–9.0%、11.9%、14.9%；L3 系列峰值应变相应地增加了–10.3%、1.5%、–5.9%。与钢纤维掺量相比，长径比对峰值应变的影响程度较小。

(2) 聚丙烯纤维的影响

如图 5c 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：聚丙烯纤维掺量依次为 0.10%、0.15%、0.20%时，L1 系列约束 UHPC 峰值应变相应地增加了 14.7%、–14.7%、–17.6%；L2 系列峰值应变相应地增加了–7.5%、–9.0%、3.0%；L3 系列峰值应变相应地增加了–5.9%、35.3%、26.5%。聚丙烯纤维掺量对峰值应变的影响波动性较大。长径比为 396 的聚丙烯纤维掺量变化对峰值应变的影响很小，长径比为 167 和 280 的聚丙烯纤维最佳掺量分别为 0.15%和 0.10%时。掺量适宜的短聚丙烯纤维造成的基体损伤较小，又能桥接微裂纹，故能增加约束 UHPC 峰值应变。

如图 5d 所示，与不加纤维的约束 UHPC 相比：聚丙烯纤维长径比依次为 167、280、396 时，L1 系列峰值应变相应地增加了 2.9%、–17.6%、4.4%；L2 系列峰值应变相应地增加了 9.0%、–14.9%、–9.0%；L3 系列峰值应变相应地增加了–5.9%、–30.9%、–11.8%。



(a) SF, volume fraction　(b) SF, aspect ratio　(c) PF, volume fraction

(d) PF, aspect ratio　(e) Steel, tube thickness

图 5　纤维与钢管厚度对约束 UHPC 峰值应变影响

Fig. 5　Effect of fibers and steel tube thickness on peak strain of confined UHPC

(3) 钢管厚度的影响

如图 5e 所示，随钢管厚度增加，约束 UHPC 峰值应变增加。具体来说，与无约束的 UHPC 相比：钢管厚度依次为 3.5、5.5、8.0、10.0、12.0 mm 时，L1 系列约束 UHPC 峰值应变相应地增加了 44.5%、109.0%、72.1%、93.7%、127.5%；L2 系列峰值应变相应地增加了 78.3%、70.0%、50.5%、203.7%；L3 系列峰值应变相应地增加了 66.0%、85.5%、66.0%、108.3%、199.5%。

2.2.3　典型轴心受压应力–应变曲线　约束 UHPC 轴心受压应力–应变典型曲线主要有 3 种类型，如图 6 所示。Ⅰ型曲线：钢管厚度较小，约束作用小，超高性能混凝土会发生斜剪破坏；Ⅱ型曲线：钢管厚度适中，约束作用较前者大，超高性能混凝土仍会发生斜剪破坏，但破坏程度减弱；Ⅲ型曲线：钢管厚度大，约束作用强，超高性能混凝土发生挤压流动破坏。3 种典型曲线可认为分别对应 3 种约束状态：弱约束、中等约束和强约束。

弱约束状态下 UHPC 轴心受压应力-应变曲线可分为弹性阶段(*OA* 段)、弹塑性阶段(*AB* 段)、下降段(*BC* 段)和平台段(*CD* 段)，如图 6a 所示。

弹性阶段(*OA* 段)：加载初期(极限荷载 70%前)，轴向荷载较小，UHPC 处于弹性阶段，轴向应力与应变呈线性关系。此时，由于钢材 Poisson 比大于 UHPC 的 Poisson 比，故钢管的约束作用几乎为零，UHPC 实际为单轴受压状态。若向 UHPC 加入纤维，将延长弹性阶段并增加弹性阶段曲线斜率。

弹塑性阶段(*AB* 段)：继续加载，UHPC 开裂，其泊松比逐渐增加以至大于钢材 Poisson 比，钢管开始约束 UHPC。随着 UHPC 横向变形不断增大，钢管的约束作用也随之不断增加，直至钢管屈服。此阶段中，UHPC 由于开裂而产生不可恢复的变形，应力-应变曲线逐渐偏离线性而表现出非线性特征。若向 UHPC 中加入纤维，同样将延长弹塑性阶段，其原因是纤维能有效抑制裂缝的产生与发展，使 UHPC 横向变形增长速度减慢。

下降段(*BC* 段)：随着荷载继续增加，由于钢管的约束作用弱，UHPC 中裂纹开始失稳扩展，剪切主裂纹快速发展而相互贯通，桥接于裂缝处的聚丙烯纤维不断被拉断，钢纤维不断被拉出。UHPC 逐渐失效，轴向应力下降，且下降的速度较快。此阶段末，UHPC 将被剪切破坏带分成上下两个部分。

平台段(*CD* 段)：此时，UHPC 已失效。当荷载继续增加，由于钢管并未发生破坏，仍具有约束作用，UHPC 将沿着剪切破坏带慢慢滑移，而具有一定的残余应力。残余应力与破坏曲面间的摩擦力、钢管的约束作用等有关。

中等约束状态下 UHPC 轴心受压应力-应变曲

线可分为弹性阶段(*OA* 段)、弹塑性阶段(*AB* 段)、下降段(*BC* 段)和缓慢上升段(*CD* 段)，如图 6b 所示。中等约束与弱约束下 UHPC 应力–应变曲线差别并不大，主要是第 4 阶段有所不同。造成不同的原因是中等约束下 UHPC 破坏程度更小，桥接于裂缝处的纤维并未被完全拔出而失效，纤维能够继续增强混凝土，且外部钢管也可发挥约束作用，故 UHPC 在加载后期轴向应力还有所增加。

强约束状态下 UHPC 轴心受压应力-应变曲线可分为弹性阶段(*OA* 段)、弹塑性阶段(*AB* 段)和平台段(*BC* 段)，如图 6c 所示。

弹性阶段(*OA* 段)与前两种没有明显差别。弹性阶段与弹塑性阶段的分界是混凝土开裂，对于普通混凝土，开裂应变应主要与混凝土强度有关，对于 UHPC，开裂应变也与纤维有关[19]，但不论是哪种混凝土，弹性阶段内约束应力都仅有较小的发展程度而对开裂应变的影响很小[20]，这点与主动约束混凝土有所不同。

弹塑性阶段(*AB* 段)则比前两种更长。此阶段内，由于约束作用大，UHPC 内部裂纹发展非常缓慢，而且随着 UHPC 横向变形增加，约束应力进一步增大，已张开的裂纹又将被逐渐压实。此阶段末，超

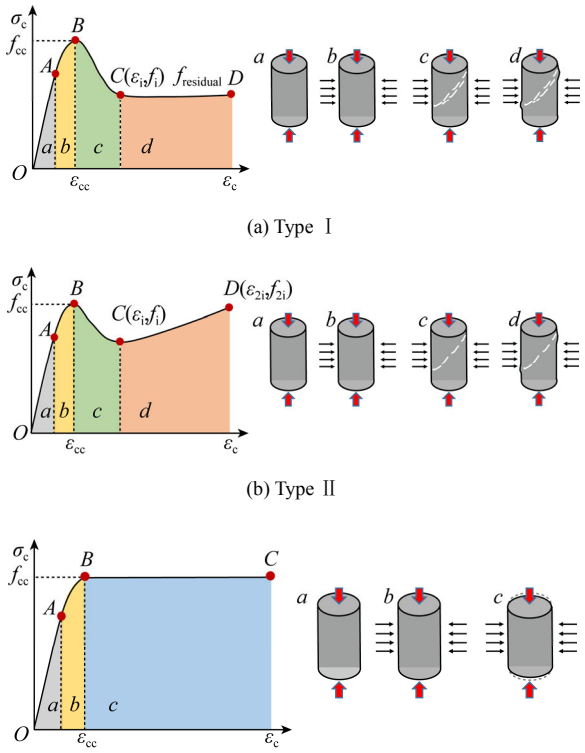


图 6 约束 UHPC 典型应力-应变曲线

Fig. 6 Typical stress-strain curves of confined UHPC

高性能混凝土达到极限状态，此极限状态可认为是 UHPC 内部的损伤发展速度与由于约束作用产生的强度增强速度相当，宏观表现为轴向应力不再增加。此时，UHPC 已屈服，且没有形成贯通的宏观裂缝。

3 约束 UHPC 受压本构模型

经典的约束混凝土应力–应变关系数学模型有 Sargin 模型[21]、Kent-Park 模型[22]、Popovics 模型[23]、Mander 模型[24]、Attard & Setunge 模型[25]等。对于钢管约束混凝土，韩林海模型[26]和 Saenz 模型[27]的应用也较多。以上数学模型均基于普通混凝土而提出，对加入了纤维的 UHPC 并不完全适用。结合约束 UHPC 应力–应变曲线试验结果，发现 Sargin 模型适用于曲线上升段，韩林海模型适用于曲线下降段。因此，提出约束 UHPC 本构模型如下：

Ⅰ型曲线的本构模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} 0\leqslant x\leqslant 1, y=\dfrac{Ax-x^2}{1+(A-2)x} \\ 1<x\leqslant \dfrac{\varepsilon_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}, y=\dfrac{x}{\alpha_{\mathrm{d}}(x-1)^2+x} \\ x>\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}, y=\dfrac{f_{\mathrm{i}}}{f_{\mathrm{cc}}} \end{cases} \tag{1}$$

Ⅱ型曲线的本构模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} 0\leqslant x\leqslant 1, y=\dfrac{Ax-x^2}{1+(A-2)x} \\ 1<x\leqslant \dfrac{\varepsilon_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}, y=\dfrac{x}{\alpha_{\mathrm{d}}(x-1)^2+x} \\ \dfrac{\varepsilon_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}<x\leqslant \dfrac{\varepsilon_{2\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}, y=\dfrac{f_{\mathrm{i}}}{f_{\mathrm{cc}}}+\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}{f_{\mathrm{cc}}}\dfrac{f_{2\mathrm{i}}-f_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{2\mathrm{i}}-\varepsilon_{\mathrm{i}}}\left(x-\dfrac{\varepsilon_{\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}\right) \\ x>\dfrac{\varepsilon_{2\mathrm{i}}}{\varepsilon_{\mathrm{cc}}}, y=\dfrac{f_{2\mathrm{i}}}{f_{\mathrm{cc}}} \end{cases} \tag{2}$$

III 型曲线的本构模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} 0\leqslant x\leqslant 1, y=\dfrac{Ax-x^2}{1+(A-2)x} \\ x>1, y=1 \end{cases} \tag{3}$$

此时，Ⅰ型和Ⅱ型曲线模型含有 2 个待定系数 A 和 α_{d}，III 型曲线模型含有 1 个待定系数 A。系数 A 按式(4)确定，系数 α_{d} 则根据归一化的应力-应变曲线拟合得到，如式(5)所示。

$$A=\frac{E_{\mathrm{c}}\varepsilon_{\mathrm{cc}}}{f_{\mathrm{cc}}} \tag{4}$$

$$\alpha_{\mathrm{d}}=0.124\exp\left(\frac{193}{\alpha f_{\mathrm{y}}}\right) \tag{5}$$

式中：E_{c} 为超高性能混凝土弹性模量；f_{cc} 和 $\varepsilon_{\mathrm{cc}}$

分别为约束 UHPC 峰值应力和峰值应变；α 为含钢率。

本构模型中的峰值应力 f_{cc} 按式(6)确定，f_{cc}/f_c (f_c 为 UHPC 的抗压强度)计算值与试验值之比如图 7a 所示，均值为 1.004，变异系数为 7.09%，拟合结果良好。

$$\frac{f_{cc}}{f_c}=1+\frac{t}{D}\left(54.279\frac{t}{D}-2.710\right)+\frac{f_y}{f_c}\left(0.038\frac{f_y}{f_c}-0.012\right) \tag{6}$$

式中，D 为钢管外径。

峰值应变按式(7)确定，$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ 计算值与试验值之比如图 7b 所示，均值为 1.008，变异系数为 9.15%，拟合结果良好。

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}}=1+\theta\left(-0.231\theta+0.633\right)+\left(\frac{f_{cc}}{f_c}-1\right)^{\left(-2.717\frac{f_{cc}}{f_c}+7.160\right)} \tag{7}$$

(ε_i, f_i)为约束 UHPC 峰后轴向应力最小的点。随着约束作用增强，UHPC 轴向应力在峰值点后的下降将逐渐变得缓慢，且下降得越少。套箍系数 θ 能够反映约束作用，而纤维的影响能通过超高性能混凝土抗压强度 f_c 体现。因此，认为 f_i 与套箍系数 θ、超高性能混凝土抗压强度 f_c 有关。通过对约束 UHPC 应力-应变曲线上的(ε_i, f_i)点进行回归分析后，建立 f_i 的数学表达式如式(8)所示。f_i/f_{cc} 计算值与试验值之比如图 7c 所示，均值为 1.002，变异系数为 4.94%，拟合结果良好。

$$\frac{f_i}{f_{cc}}=1.477-\frac{0.304}{\theta}-8.057\frac{\ln f_c}{f_c} \tag{8}$$

如图 7d 所示，ε_i 与 ε_{cc} 具有较好的线性关系。基于试验数据回归拟合，得式(9)。ε_i 计算值与试验值之比的均值为 1.032，变异系数为 14.54%。

$$\varepsilon_i=1.749\varepsilon_{cc} \tag{9}$$

$(\varepsilon_{2i}, f_{2i})$为峰后上升段轴向应力最大的点。其中，$\varepsilon_{2i}$ 为 5 倍的峰值应变 ε_{cc}，f_{2i} 按式(10)确定。图 7e 为 f_{2i} 计算值与试验值之比，拟合结果良好。

$$\frac{f_{2i}}{f_{cc}}=1.660\theta\ln f_c-3.072\theta^2-0.177\left(\ln f_c\right)^2 \tag{10}$$

图 8 为模型计算曲线与约束 UHPC 应力-应变试验曲线的对比，吻合良好。另外，为进一步验证本构模型的有效性，选取了文献[28–30]中的部分圆钢管超高性能混凝土短柱轴心受压试验结果进行了对比，如图 9 所示，荷载-应变预测曲线与试验结果吻合较好。

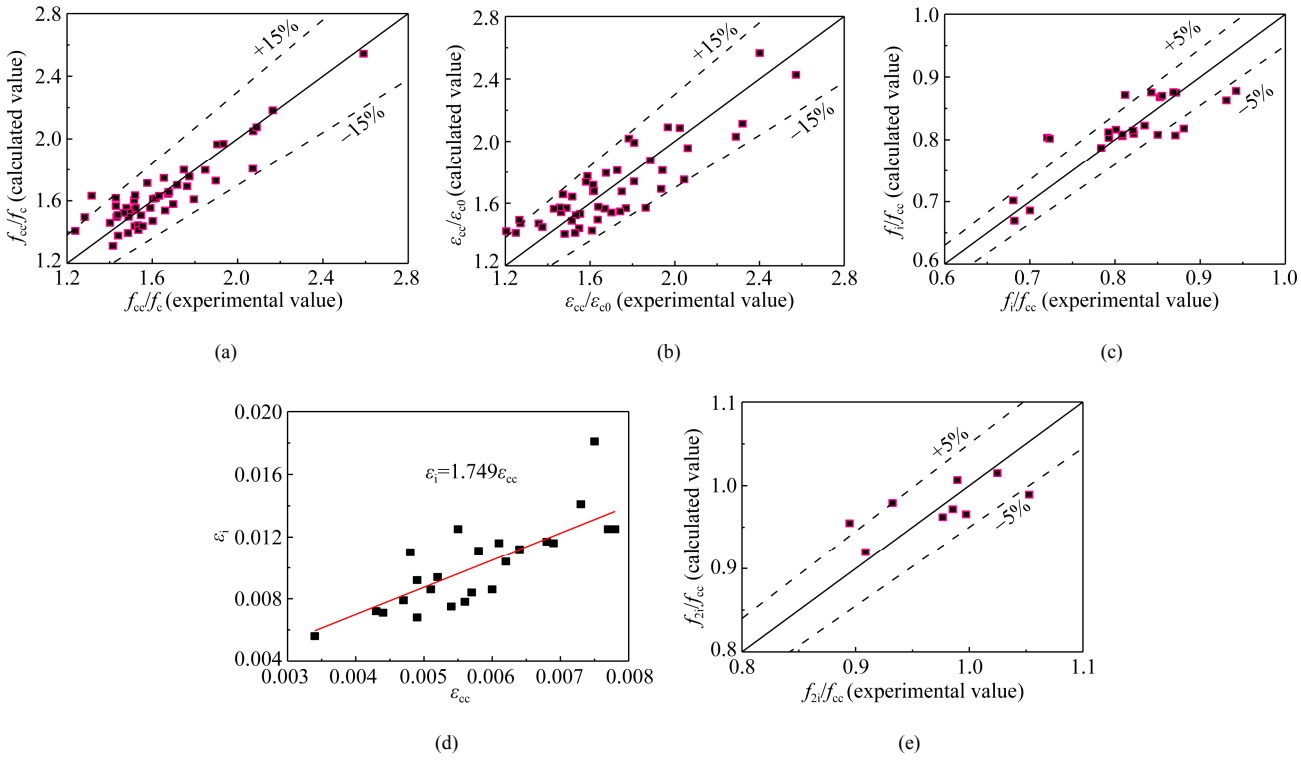


图 7　曲线特征点计算结果与试验结果的对比

Fig. 7　Comparison between calculation and experimental results of curve characteristic points

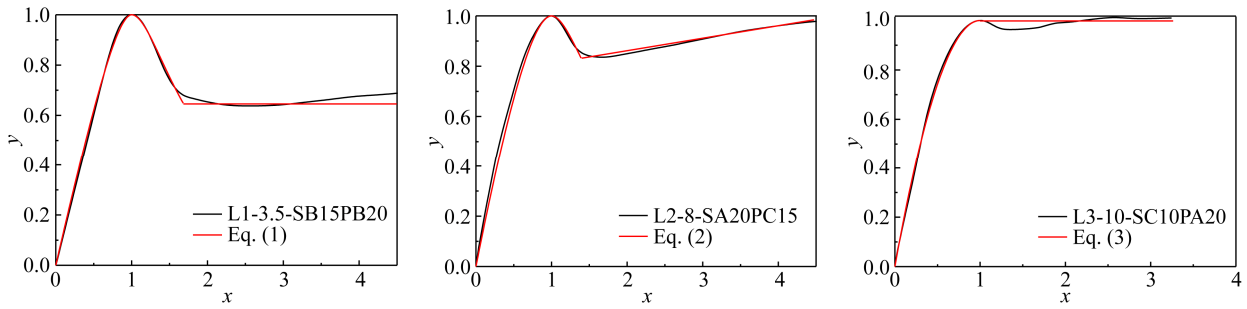


图 8 模型计算曲线与本试验曲线的对比

Fig. 8 Comparison between predicted curves of proposed model and experimental curves in this work

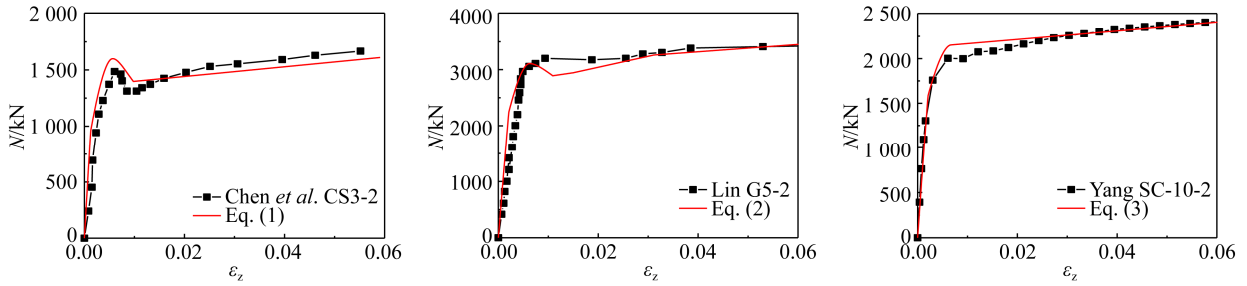


图 9 模型计算曲线及与文献试验曲线的对比

Fig. 9 Comparison between predicted curves of proposed model and experimental curves in the literature

4 结论

1) 随着钢管厚度从 3.5 mm 增加至 12.0 mm，UHPC 力学性能不断提高，应力–应变曲线形状逐渐发生变化，峰值点处更圆滑，峰后轴向应力下降更缓慢，峰值应力与应变显著增加。

2) 混杂纤维可提高约束 UHPC 峰值应力与应变。其中，钢纤维的影响比聚丙烯纤维的影响大，钢纤维掺量的影响比长径比的影响大。钢纤维最佳掺量与长径比分别为 2.0%和 60，聚丙烯纤维最佳掺量和长径比分别为 0.15%和 167。

3) 约束 UHPC 具有 3 种典型应力–应变曲线，分别对应弱约束、中等约束和强约束状态。针对典型曲线，提出了相应的受压本构模型，与已有文献和本试验结果吻合良好。

参考文献:

[1] 史才军, 何稳, 吴泽媚, 等. 纤维对UHPC力学性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015(8): 2227–2236.
SHI Caijun, HE Wen, WU Zemei, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(8): 2227–2236.

[2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(7): 1501–1511.

[3] WU Z, SHI C, HE W, et al. Uniaxial compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber[J]. J Mater Civil Eng, 2016, 28(12): 6016017.

[4] DONG S, HAN B, YU X, et al. Constitutive model and reinforcing mechanisms of uniaxial compressive property for reactive powder concrete with super-fine stainless wire[J]. Compos Part B: Engineering. 2019, 166: 298–309.

[5] LIU Z, CHEN W, WENHUA Z, et al. Complete Stress-Strain Behavior of Ecological Ultra-High-Performance Cementitious Composite under Uniaxial Compression[J]. Aci Mater J, 2017, 114(5), 783–794.

[6] BAE B, CHOI H, LEE B, et al. Compressive Behavior and Mechanical Characteristics and Their Application to Stress-Strain Relationship of Steel Fiber-Reinforced Reactive Powder Concrete[J]. Adv Mater Sci Eng, 2016, 2016: 1–11.

[7] 邓宗才. FRP厚度和品种对约束UHPC轴压性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(2): 218–222.
DENG Zongcai. J Harbin Eng Univ (in Chinese), 2016, 37(2): 218–222.

[8] 邓宗才, 白玉磊, 曲玖龄. HFRP管约束超高性能混凝土的本构模型[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(2): 253–260.
DENG Zongcai, BAI Yulei, QU Jiuling. J Beijing Univ Technol (in Chinese), 2016, 42(2): 253–260.

[9] 曹思琦. 圆钢管活性粉末混凝土柱受压极限承载力的有限元分析[D]. 北京交通大学, 2014.
CAO Siqi. Finite Element Analysis of Ultimate Bearing Capacity for Compressed Reactive Powder Concrete Filled Steel Tube Column (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.

[10] WU Z, SHI C, HE W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements[J]. Cem Concr Compos, 2017, 79: 148–157.

[11] WU Z, SHI C, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 103: 8–14.

[12] ZHENG W, LUO B, WANG Y. Microstructure and mechanical

properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures[J]. Mag Concr Res, 2014, 66(8): 397–408.

[13] HUANG L, CHI Y, XU L, et al. Local bond performance of rebar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic loading[J]. Constr Build Mater, 2016, 103: 77–92.

[14] 尹玉辉. 拉丁超立方体设计的构造与超饱和设计的分析[D]. 南开大学, 2013.
YIN Yuhui. Consturction of Latin Hypercube Design and Analysis of Supersaturated Designs (in Chinese, dissertation). Tianjin: Nankai University, 2013.

[15] 活性粉末混凝土[S]. 北京, 中国国家标准化管理委员会, 2015.

[16] 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法[S]. 北京, 中国国家标准化管理委员会, 2010.

[17] 路远. 单轴和三轴应力下棱柱体混凝土力学特性[D]. 北京交通大学, 2017.
LU Yuan. The Mechanical Properties of Prismatic Concrete under Uniaxial and Triaxial Stress (in Chinese, dissertation). Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

[18] HOANG A L, FEHLING E, LAI B, et al. Experimental study on structural performance of UHPC and UHPFRC columns confined with steel tube[J]. Eng Struct, 2019, 187: 457–477.

[19] HANNAWI K, BIAN H, PRINCE-AGBODJAN W, et al. Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes[J]. Compos Part B: Engineering, 2016, 86: 214–220.

[20] DONG C X, KWAN A K H, HO J C M. A constitutive model for predicting the lateral strain of confined concrete[J]. Eng Struct, 2015, 91: 155–166.

[21] SARGIN M. Stress-Strain Relationship for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections[C]. 1971: 23–46.

[22] KENT D C, PARK R. Flexural members with confined concrete[J]. J Struct Division, 1971, 97(ST7): 1969–1990.

[23] POPOVICS S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete[J]. Cem Concr Res, 1973, 3: 583–599.

[24] MANDER J B, PRIESTLEY M, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. J Struct Eng-ASCE, 1988, 114(8): 1804–1826.

[25] ATTARD M M, SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete[J]. Aci Mater J, 1996, 93(5): 432–441.

[26] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2016: 101−118.

[27] SAENZ L P. Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishnan[J]. ACI J, 1964, 61(9): 1229–1235.

[28] CHEN S, ZHANG R, JIA L, et al. Structural behavior of UHPC filled steel tube columns under axial loading[J]. Thin Wall Struct, 2018, 130: 550–563.

[29] 林震宇. 圆钢管RPC轴压柱受力性能研究[D]. 福州大学, 2004.
LIN Zhenyu. Research on Behavior of RPC Filled Circular Steel Stub Axial Columns (in Chinese, dissertation). Fuzhou: Fuzhou University, 2004.

[30] 杨英欣. 钢管超高性能混凝土短柱轴心受压性能试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
YANG Yingxin. Experimental Study on the Axial Compressive Behavior of Ultra-high Performance Concrete Filled Steel Tube Short Columns. Wuhan: Wuhan University, 2019.