文章编号:1674-2974(2024)05-0012-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024043

超高性能海水海砂混凝土单轴受压应力-应变关系

朱德举[1,2†],王鹏[1]
[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082]

摘 要:为研究超高性能海水海砂混凝土(Ultra-High Performance Seawater Sea-sand Concrete,UHPSSC)轴压应力-应变关系,探究钢纤维体积掺量对UHPSSC轴压力学性能和轴压应力-应变全曲线的影响,使用Instron 1346万能材料试验机测得UHPSSC应力-应变全曲线,借助Pycharm曲线拟合程序与已有混凝土应力-应变全曲线模型进行拟合与修正.结果表明:钢纤维掺量越高,轴压作用下UHPSSC的破坏程度越小,抗压强度和峰值应变也随之增加;已有模型拟合的UHPSSC应力-应变全曲线上升段与试验曲线比较相近,下降段后期差距较大;通过修正下降段形状参数,得到了更适用于描述UHPSSC应力-应变全曲线的修正模型,并验证该修正模型的适用范围.

关键词:超高性能海水海砂混凝土;钢纤维;力学性能;应力-应变全曲线;修正模型
中图分类号:TU528.572 **文献标志码**:A

Uniaxial Compression Stress-strain Relationship of Ultra-high Performance Seawater Sea-sand Concrete

ZHU Deju[1,2†],WANG Peng[1]
[1. College of Civil Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China;
2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province (Hunan University),Changsha 410082,China]

Abstract:To explore the axial compressive stress-strain relationship of Ultra-High Performance Seawater Sea-sand Concrete (UHPSSC) and study the influence of steel fiber volume content on the axial compressive mechanical properties and axial compressive complete stress-strain curve of UHPSSC, the complete stress-strain curve of UHPSSC was obtained through the compression tests with the Instron 1346 universal material , and the Pycharm curve fitting program was used to fit and modify the existing concrete complete stress-strain curve model. The results show that the higher the steel fiber content, the smaller the damage degree of UHPSSC under axial compression, and the compressive strength and peak strain also increase. The rising section of the UHPSSC stress-strain curve fitted by the existing model is similar to the test curve, and the gap between the falling section and the later stage is large. By modifying the shape parameters of the descending section, a modified model more suitable for describing the

* **收稿日期**:2023-05-21
基金项目:国家自然科学基金山东联合基金项目(U1806225),National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund (U1806225)
作者简介:朱德举(1978—),男,山东济宁人,湖南大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail: dzhu@hnu.edu.cn

complete stress-strain curve of UHPSSC was obtained, and the applicable scope of the modified model was verified.

Key words: ultra-high performance seawater sea-sand concrete; steel fiber; mechanical properties; complete stress-strain curve; modified model

随着城市化进程的推进,河砂和淡水资源日益短缺.海水、海砂总量丰富,易于获取,可替代淡水和河砂作为混凝土原材料.已有研究表明[1-2],海水海砂混凝土与普通混凝土力学性能相近,但是其含有的盐离子会加速钢筋锈蚀,影响建筑使用寿命.氯离子的腐蚀一直是阻碍其应用的最大障碍.

针对上述问题,可以采用耐腐蚀FRP(Fiber Reinforced Polymer)筋代替钢筋,制备FRP筋增强海水海砂混凝土结构[3-5];也可以在海水海砂混凝土中加入阻锈剂延缓锈蚀[6];还可以利用海水和海砂制备UHPSSC[7-10].研究发现UHPSSC具有极佳的抗渗性能和致密的微观结构,使得内部钢纤维不会发生严重的腐蚀问题[11],海水海砂UHPC钢筋试样养护1 080 d后内部钢筋未发生锈蚀[12].

近年来,国内外学者对超高性能海水砂混凝土开展试验研究并取得了一些进展.朱德举等[13]通过正交试验研究了配合比参数和纤维种类对UHPSSC力学性能的影响;Teng等[14]制备出了抗压强度超过180 MPa的超高性能海水海砂混凝土,研究了海水和海砂的使用对UHPSSC力学性能的影响;Li等[15]研究表明,高性能海水海砂混凝土结构在海洋环境中服役一年后完好无损,无开裂或缺陷,并且内部的钢纤维没有腐蚀,适合推广应用;Wang等[16]研究发现,对于钢纤维增强的超高性能混凝土,由于纤维-基体的优良粘结性能和钢纤维超高的弹性模量,当拉伸应变接近钢筋屈服应变时,其裂缝宽度一般仅为20~30 μm,具有很好的裂缝宽度控制能力;Rajczakowska等[17]研究显示,潮湿环境下,超高性能混凝土的二次水化和碳化耦合反应能够使得裂缝自愈合,较小的裂缝宽度自愈合效率更高.因此在正常情况下,钢纤维增强的超高性能混凝土不会产生对结构有不利影响的较大裂缝.

应力-应变关系能够描述混凝土在不同受力情况下的变形性能、承载能力和荷载下的破坏行为.在混凝土结构设计分析中,应力-应变关系广泛应用于材料力学分析、结构强度分析、地震动力学分析等领域,以评估结构的工作性能和安全性能.

在海水海砂混凝土应力-应变关系研究方面,目前仅对普通强度等级的海水海砂混凝土开展了研究:卢佳[18]研究了不同龄期和配合比下海水和海砂置换率对混凝土应力应变关系的影响,研究结果显示海水海砂会提高峰值应力,而且海水海砂混凝土的应力应变下降段曲线更为陡峭;张凯建等[19]研究了海水海砂再生混凝土的应力应变本构关系,CT测试结果显示海水海砂会降低混凝土孔隙率,从而提高峰值应力.相比于普通混凝土,高强度混凝土和超高性能混凝土的应力-应变全曲线测试更为困难,其达到峰值应力后极易发生剪切破坏,下降段较难测得.对试验机的刚度要求很高,一般借助刚性支架或者刚度特别大的试验机开展测试.

综上,研究UHPSSC的轴压应力-应变关系,对促进其在结构设计和工程上的应用具有重要意义.本文重点研究UHPSSC在轴压荷载下的应力-应变全曲线,探究钢纤维掺量对UHPSSC力学性能的影响规律,并对应力-应变全曲线进行拟合与修正,得到更适用于UHPSSC的应力-应变全曲线方程,为UHPSSC的非线性分析和工程应用提供参考.

1　试验概况

1.1　试件设计

本次试验的变量为钢纤维体积掺量,分别掺入体积分数为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的钢纤维,钢纤维的体积掺量是指钢纤维在混凝土中的体积比例.考虑到试验机量程和测试安全性,UHPSSC应力-应变全曲线测试试块尺寸参照文献[20-21]选用φ50×100圆柱体,每组试块6个,其中3个用于强度测试,另外3个用于轴压应力-应变全曲线测试.共设计了4组共24个试样用于测试UHPSSC的单轴受压应力-应变全曲线.无纤维UHPSSC无法测得应力-应变全曲线,但为研究钢纤维对力学性能的影响,对其进行加载模式下的抗压强度试验,测得其抗压强度和峰值应变.

1.2　原材料

海砂为山东产海砂,粒径在0.6~2.36 mm之间,氯离子含量0.012%,对原状海砂试样进行筛分试验,

得到海砂级配曲线,见图1;水泥选用南方牌P.O 42.5级普通硅酸盐水泥;粉煤灰和硅灰为河南工艺市元亨净水材料厂生产.硅灰 SiO_2 质量分数为97.35%,比表面积24 000 m^2/kg;粉煤灰为优质一级粉煤灰,SiO_2 质量分数为55.71%,Al_2O_3 质量分数为32.79%.纤维为镀铜平直钢纤维,直径为0.220 mm,抗拉强度为2 840 MPa,长径比为59.1.根据朱德举等[13]研究成果,由工作性能与力学性能确定配合比,见表1.海水为人工配置海水,其化学成分见表2.

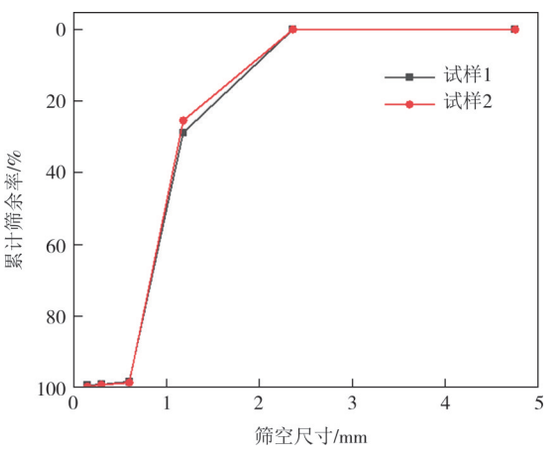


图1 海砂的级配曲线

Fig.1 Gradation curve of sea-sand

表1 UHPSSC配合比

Tab.1 Mixture ratio of UHPSSC $kg \cdot m^{-3}$

水泥	海水	海砂	硅灰	粉煤灰	减水剂	消泡剂
736.5	168	946.6	210	105	21	8.4

表2 人工海水化学成分

Tab.2 Chemical composition of artificial seawater

成分	NaCl	$MgCl_2$	Na_2S_4	$CaCl_2$	KCl	$NaHCO_3$
浓度/($g \cdot L^{-1}$)	24.53	5.20	4.09	1.16	0.695	0.201

1.3 试件浇筑与养护

试块在湖南大学绿色建材实验室进行制备与养护,同一种配合比试块一次性搅拌浇筑成型.首先将减水剂溶于海水中,然后将称量好的胶凝材料和海砂倒入搅拌锅中,慢速搅拌3 min,加入海水和消泡剂,慢速搅拌4 min,沿边缘加入钢纤维慢速搅拌3 min,最后高速搅拌5 min,将拌合物倒入模具中振动密实,在养护室静置1 d后脱模,在80 ℃蒸养箱里养护3 d,然后自然放置至7 d.

各掺量UHPSSC在该搅拌流程下流动性良好,均可以正常浇筑装模成型.

1.4 加载方式与数据采集

UHPSSC轴压应力-应变全曲线测试加载仪器为Instron 1346万能材料试验机,如图2所示.前期采用力控制方式进行预加载,达到大约2/3峰值荷载处转变为位移控制.参考文献[22]和预实验结果,超高性能海水海砂混凝土力控制阶段的加载速度设置为90 kN/min,位移控制阶段的加载速度设置为0.001 5 mm/s;最大位移设置为3.0 mm.

在超高性能海水海砂混凝土圆柱试件侧面贴纵向与横向应变片,通过DH 3817动静态应变测试系统对加载过程中的纵向与横向应变进行数据采集,通过位移计和压力传感器测量试件的荷载-位移曲线.

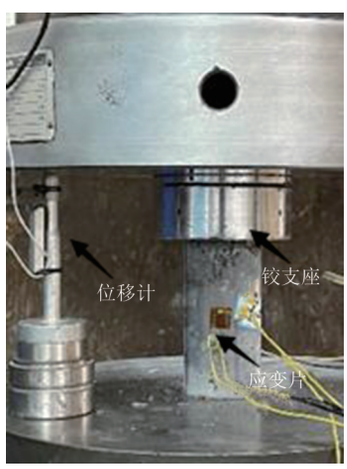


图2 UHPSSC应力-应变加载测试图

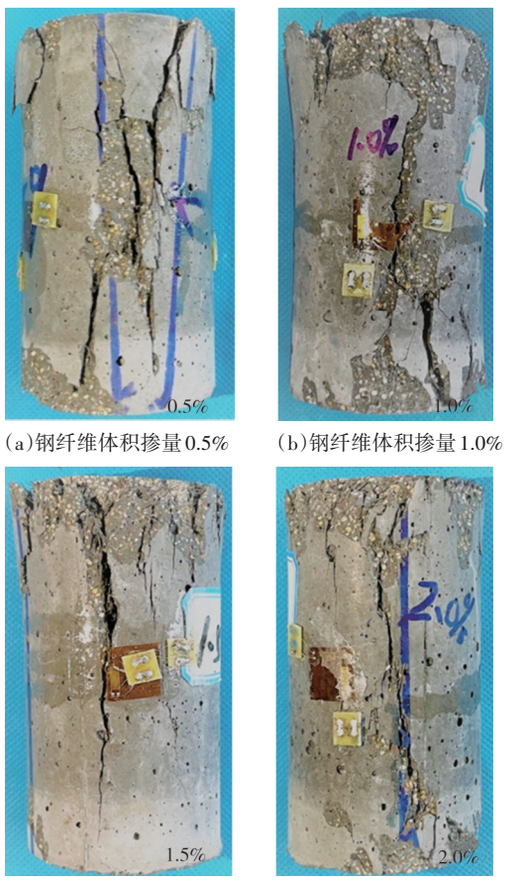
Fig.2 UHPSSC stress-strain loading test

2 试验结果

2.1 单轴受压破坏模式

如图3所示,超高性能海水海砂混凝土强度高,在前期加载过程中几乎无裂缝产生.随着荷载的增大,顶部出现细小纵向裂缝,慢慢向下延展,轴压过程中会有小碎块弹出,试块压缩并沿横向慢慢鼓起膨胀,表面有碎片脱落,漏出钢纤维;最终试块上表面被压碎压坏,且圆柱体侧面会有1~2条上下贯穿裂缝.

钢纤维体积掺量1.5%和2.0%的UHPSSC,其受压面相对完整,脱落的混凝土碎块较少.轴压过程中,钢纤维与UHPSSC基体之间的黏结力可以起到阻裂作用,延缓裂缝扩展速度,因此加钢纤维的UHPSSC试块未发生炸裂.



(a)钢纤维体积掺量0.5%　(b)钢纤维体积掺量1.0%

(c)钢纤维体积掺量1.5%　(d)钢纤维体积掺量2.0%

图3　UHPSSC轴压测试破坏图

Fig.3　Failure pattern of UHPSSC under axial compression test

2.2　应力-应变全曲线

对测得的试验曲线分析处理,得到含钢纤维UHPSSC的均值应力-应变全曲线,见图4.超高性能混凝土轴压应力-应变全曲线发展过程一般包括弹性阶段、裂缝稳定发展阶段、裂缝失稳扩展阶段和破坏阶段[23],超高性能海水海砂混凝土轴压应力-应变全曲线发展过程与超高性能混凝土基本相同.

由测试结果可知,钢纤维体积掺量对上升段曲线形式几乎无影响,但是会提高UHPSSC的抗压强度和峰值应变.下降段曲线均比较陡峭,钢纤维体积掺量越高,下降段后期残余应力值相对越大;2.0%掺量UHPSSC残余应力最大,0.5%掺量UHPSSC残余应力最小,1.0%和1.5%掺量的UHPSSC残余应力相近且位于前两者之间.

2.3　应力-应变全曲线特征指标

应力-应变全曲线特征指标包括峰值应变、抗压强度、弹性模量和韧性指标.压力机测得的UHPSSC抗压强度见图5,参照《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018)[24]和《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[25]规范,得到100 mm×100 mm×

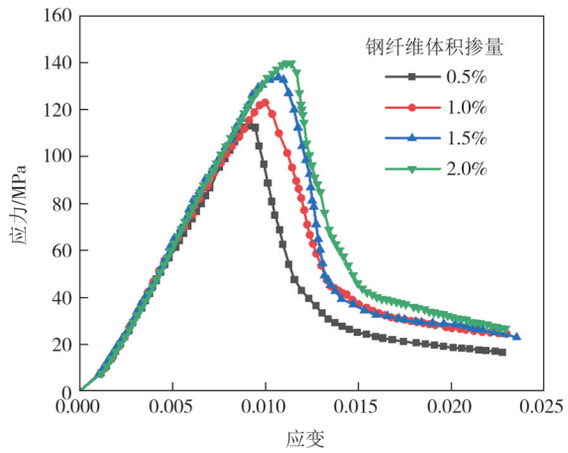


图4　不同钢纤维体积掺量UHPSSC应力-应变全曲线

Fig. 4　Complete stress-strain curve of UHPSSC with different steel fiber volume fractions

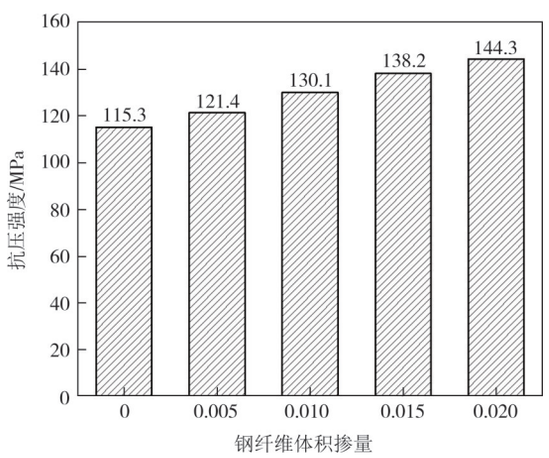


图5　UHPSSC轴心抗压强度

Fig.5　Axial compressive strength of UHPSSC

100 mm UHPSSC立方体抗压强度(无纤维)为128.2 MPa.利用Instron 1346试验机和应变测试系统,测得UHPSSC在轴压作用下的抗压强度、峰值应变、弹性模量和泊松比.韧性指标为UHPSSC全应力-应变关系曲线积分所得的面积,表示耗能大小.通过表3可知,随着钢纤维体积掺量的增加,UHPSSC的抗压强度和峰值应变、韧性指标均增大:以0.0%掺量UHPSSC为基准,0.5%、1.0%、1.5%、2.0%掺量的UHPSSC抗压强度分别提高7.3%、16.7%、27.0%、32.6%,峰值应变分别提高13.8%、25.0%、37.5%、42.5%;UHPSSC上升段大致呈线性,无纤维UHPSSC达到峰值应力后会突然降到0,因此可以用0.5%UHPSSC应力值在0~105.34 MPa之间积分数值作为韧性指标基准,韧性指标分别提高了1.36倍、1.94倍、2.16倍、2.41倍;弹性模量提高幅度较小,最大未超过5%.

表3 UHPSSC轴压力学性能

Tab.3 Mechanical performance of UHPSSC under axial compression

钢纤维体积掺量/%	峰值应变	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	韧性指标/MPa
0.0	0.008 0	105.34	43.41	0.405
0.5	0.009 1	113.08	44.06	0.957
1.0	0.010 0	122.95	44.72	1.190
1.5	0.011 0	133.75	45.37	1.280
2.0	0.011 4	139.67	46.08	1.380

钢纤维对混凝土增强增韧机理的主流理论包括复合理论、纤维间距理论和界面效应理论[26].其中界面效应理论在实际工程中已得到验证,该理论认为纤维混凝土的力学性能由混凝土基体力学性能、纤维力学性能和界面粘结性能决定.钢纤维与UHPSSC基体间的粘结作用力良好,且钢纤维和UHPSSC本身力学性能较好,使得钢纤维超高性能海水海砂混凝土具有优越的力学性能.钢纤维掺量过量会造成不利影响,但是2.0%掺量并未过量,因此,在设定的4种掺量下,钢纤维对UHPSSC的力学性能均呈现出正向作用.

应力-应变全曲线测试的抗压强度要低于直接抗压强度,这是因为应力-应变测试加载速度慢,应变率小,加载速度越快,应变率越大,测得抗压强度值会稍大.

为了定量表示钢纤维掺量对UHPSSC峰值应力和峰值应变的影响,在这里引入纤维特征值$\lambda = \varphi \times (l/d)$,其中$\varphi$表示纤维体积掺量,$l/d$表示纤维的长径比,长径比为59.1.参考已有研究[22]采用下列公式对UHPSSC的峰值应力和峰值应变进行拟合分析,f_{cu}和ε_{cu}分别指峰值应力和峰值应变,k_1和k_2为无量纲纤维增强参数.

$$f_{cu} = f \times (1 + k_1\lambda_{sf}) \tag{1}$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon \times (1 + k_2\lambda_{sf}) \tag{2}$$

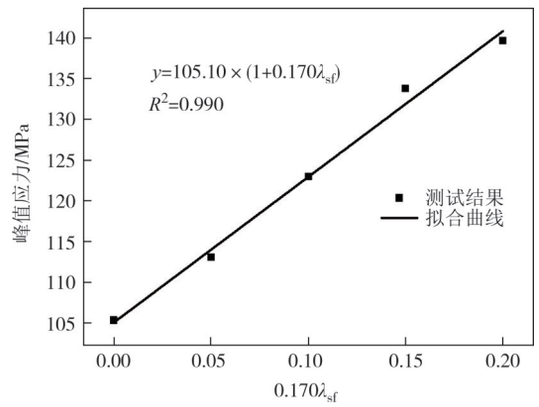
式中:f为回归分析得到的峰值应力初始值;λ_{sf}为钢纤维特征值.

回归计算结果(见图6)为:

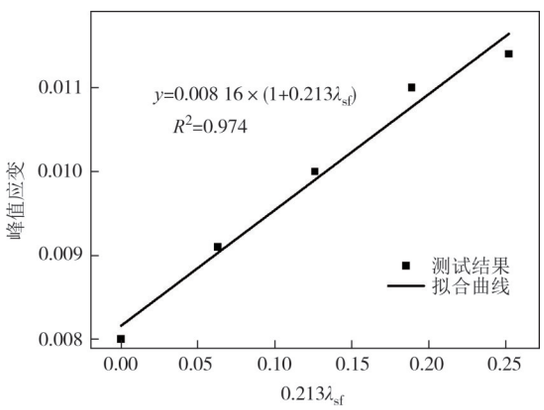
$$f_{cu} = 105.10 \times (1 + 0.170\lambda_{sf}) \tag{3}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.008\,16 \times (1 + 0.213\lambda_{sf}) \tag{4}$$

混凝土弹性模量的测试方法比较复杂,而弹性模量与抗压强度密切相关,建立弹性模量与抗压强度之间的关系式是非常有意义的.根据抗压强度适用范围选择三个预测模型,基于实验数据对UHPSSC弹性模量进行预测.根据表4统计的误差计算结果可知,文献[27]中公式的弹性模量预测结果偏大,文献[28-29]中公式的预测结果偏小,由误差绝对值可知,文献[29]中公式的预测更为准确.



(a)$f_{cu} - \lambda_{sf}$



(b)$\varepsilon_{cu} - \lambda_{sf}$

图6 线性回归关系

Fig.6 Linear regression relationship

表4 UHPSSC弹性模量预测公式

Tab.4 Elastic modulus prediction formula of UHPSSC

参考文献	公式	适用范围f_{cu}/MPa	误差值/%
郭晓宇等[28]	$E_c = \frac{1\,000}{0.017\,2 + 0.836\,4/f_c}$	60~220	-5.5
Alsalman等[27]	$E_c = 8\,010 \times f_c^{0.36}$	31~235	3.5
Graybeal[29]	$E_c = 3\,840 \times \sqrt{f_c}$	126~193	-1.6

3 应力-应变全曲线

3.1 应力-应变全曲线拟合与修正

将超高性能海水海砂混凝土应力-应变全曲线归一化处理,利用Pycharm曲线拟合程序将实验曲线与已有模型进行拟合,得出不同本构模型对应的拟

合参数.通过实验与拟合曲线的对比图和相关系数,比较不同模型的拟合效果.

UHPC 受压应力-应变全曲线的常用经验公式可分为真有理分式、假有理分式以及多项式;本文选用具有代表性的三种曲线模型[30-32],对归一化应力-应变全曲线进行拟合.各曲线表达式如下所示.

Carreira 和 Chu 真有理分式模型[32]:

$$y = \frac{nx}{n - 1 + x^n} \tag{5}$$

周传波模型[30]:

$$y = \begin{cases} ax + (5 - 4a)x^4 + (3a - 4)x^5, 0 \leqslant x \leqslant 1; \\ \dfrac{x}{b(x - 1)^2 + x}, x > 1 \end{cases} \tag{6}$$

鞠彦忠模型[31]:

$$y = \begin{cases} ax + (2 - 1.5a)x^2 + (0.5a - 1)x^4, 0 \leqslant x \leqslant 1; \\ \dfrac{bx}{1 + x^2 + (b - 2)x}, x > 1 \end{cases}$$

$$a = 1\,556V_m^3 - 7.778V_m^2 + 2.14V_m + 1.318,$$

$$b = -3\,444V_m^3 + 317.2V_m^2 - 4.106V_m + 0.112\,8,$$

$$\varepsilon_{cp} = x\varepsilon_c, \sigma_{cp} = y\sigma_c \tag{7}$$

式中:ε_{cp}表示峰值应变;ε_c表示应变;σ_{cp}表示峰值应力;σ_c表示应力;V_m表示钢纤维体积掺量.

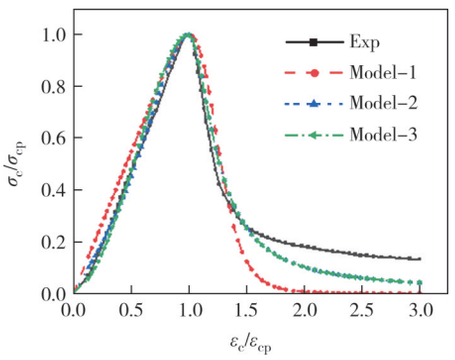
原始实验曲线记为 Exp,真有理分式拟合曲线记为 Model-1,周传波模型拟合曲线记为 Model-2,鞠彦忠模型拟合曲线记为 Model-3;不同模型方程拟合参数如表 5 所示.由拟合参数得到的拟合曲线与试验曲线对比图见图 7.

表 5　UHPSSC 应力-应变全曲线不同模型拟合参数

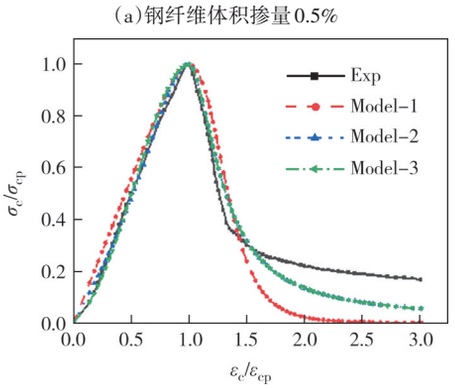
Tab.5　Fitting parameters of different models for UHPSSC complete stress-strain curve

钢纤维体积掺量/%	Model-1 (n)	Model-2 (a,b)	Model-2-C (a,b)	Model-3 (a,b)
0.5	12.04	0.76, 17.60	0.76, 9.40	0.223 0, 0.056 8
1.0	9.70	0.84, 12.75	0.84, 7.47	0.380 4, 0.078 4
1.5	20.02	0.95, 31.39	0.95, 12.13	0.570 6, 0.031 9
2.0	13.16	0.91, 24.16	0.91, 11.32	0.486 4, 0.041 4

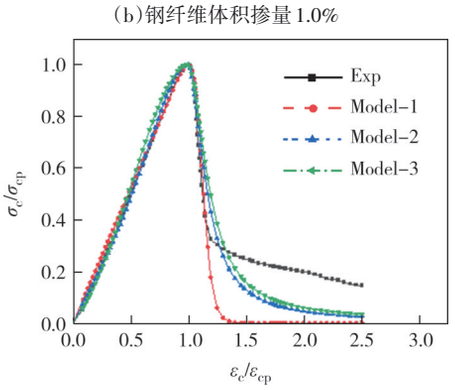
通过对比拟合曲线与试验曲线,各模型拟合曲线在上升段均与试验曲线十分吻合,在下降段各模型存在较大差异,可以明显看出 Model-1 拟合曲线在下降段后期与实验数据差距最大,Model-2 和 Model-3 拟合曲线在下降段拟合效果要优于真有理式公式,但仍与实验数据有较大差距.现有混凝土应力-应变全曲线模型基于普通混凝土应力-应变全曲线模型,普通混凝土在下降阶段后期仅存在集料与



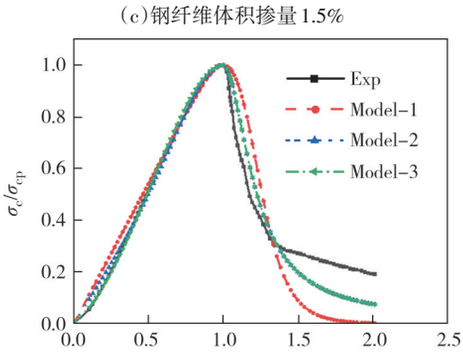
(a)钢纤维体积掺量 0.5%



(b)钢纤维体积掺量 1.0%



(c)钢纤维体积掺量 1.5%



(d)钢纤维体积掺量 2.0%

图 7　不同模型拟合曲线与试验曲线对比

Fig.7　Comparison between fitting curves and experimental curves of different models

砂浆之间的粘结残余应力,应力值较小;而在钢纤维增强 UHPC 中,UHPC 基体强度高,钢纤维弹性模量大,且钢纤维与基体间还存在一定粘结力,导致钢纤

维 UHPC 轴压作用下加载后期的残余应力较大.故对应力-应变全曲线下降段方程式进行幂次修正,Model-2 和 Model-3 模型的拟合曲线比较接近,以 Model-2 曲线方程为例进行修正,Model-2 修正拟合曲线记为 Model-2-C.

普通混凝土轴压应力-应变全曲线下降段函数的分母最高幂次一般取 2,钢纤维增强超高性能混凝土基体强度高,下降段后期更加饱满平缓,故该值需要修正.通过分析计算幂次修正后的拟合曲线相关系数,发现分母最高幂次在 1.1 到 2.2 的范围内,相关系数呈现图 8 所示的趋势.比较两个峰值处(1.4 和 2.0)的相关系数,发现分母最高幂次取 1.4 的时候,相关系数值最大,拟合效果最优.图 9 为修正后应力-应变全曲线和试验曲线对比示意图,可以发现,相比于原应力-应变全曲线,修正后应力-应变全曲线方程对下降段后期拟合结果较好.

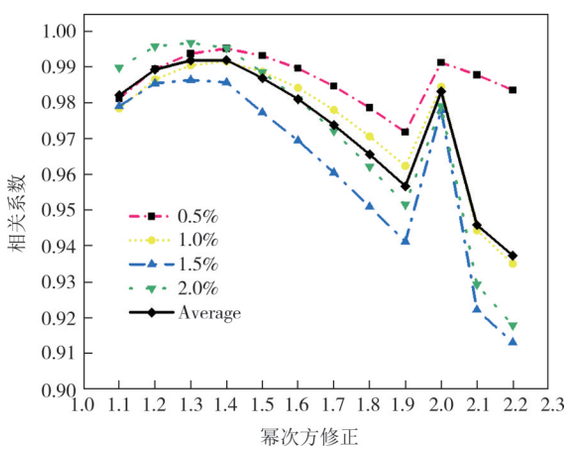


图 8 幂次修正对相关系数的影响

Fig.8 Effect of power correction on correlation coefficient

对比拟合曲线与修正曲线,修正曲线对归一化曲线后半段的拟合效果更好.因此将修正曲线作为该配比 UHPSSC 的应力-应变全曲线方程,即公式(8).将 a、b 值与纤维特征值 λ_{sf} 进行线性拟合,得到其之间的线性回归关系,即公式(9)和(10).

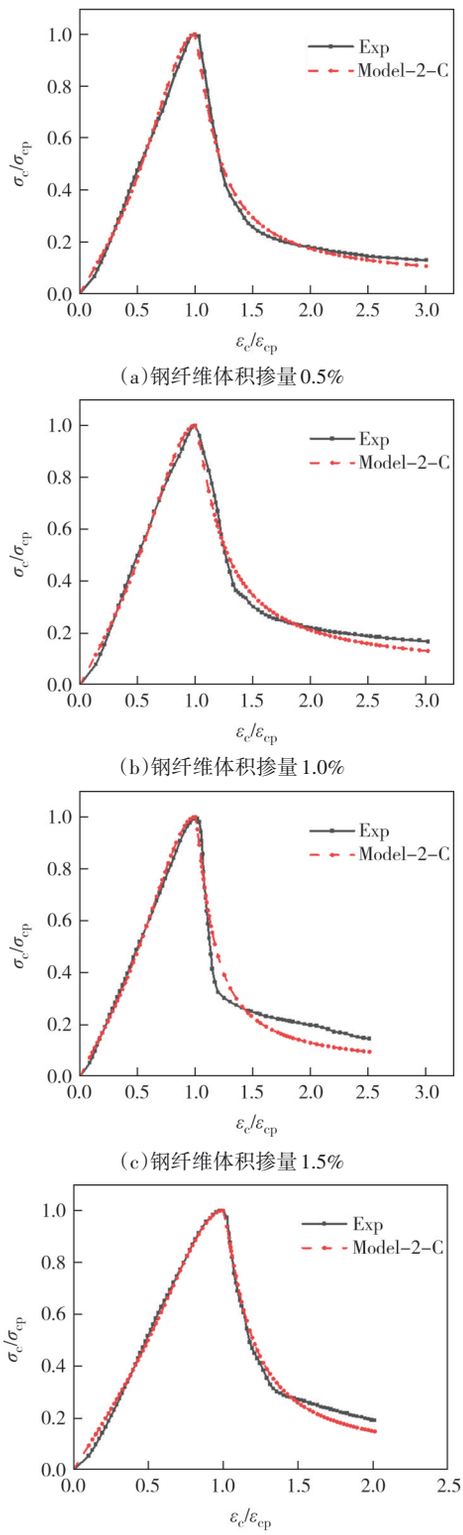
$$y=\begin{cases} ax+(5-4a)x^4+(3a-4)x^5, 0\leqslant x\leqslant 1; \\ \dfrac{x}{b(x-1)^{1.4}+x}, x>1 \end{cases} \tag{8}$$

$$a=0.73+0.227\lambda_{sf} \tag{9}$$

$$b=7.48+3.53\lambda_{sf} \tag{10}$$

3.2 应力-应变全曲线修正模型验证

通过图 9 可以看出,修正模型对该配比 UHPSSC 的拟合效果较好.为验证该模型的适用范围,对 1.0% 等和 2.0% 钢纤维体积掺量的 UHPC 应力-应变试验结果进行模型验证.参考安明喆[33]、池寅[22]、鞠彦忠[31]、黄政宇[34]、周传波[30]等关于 UHPC 单轴受压应力-应变关系的研究结果,通过图 10 发现该模型对



(a)钢纤维体积掺量 0.5%

(b)钢纤维体积掺量 1.0%

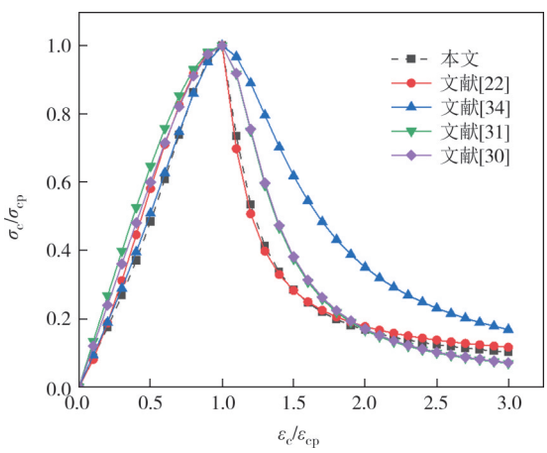
(c)钢纤维体积掺量 1.5%

(d)钢纤维体积掺量 2.0%

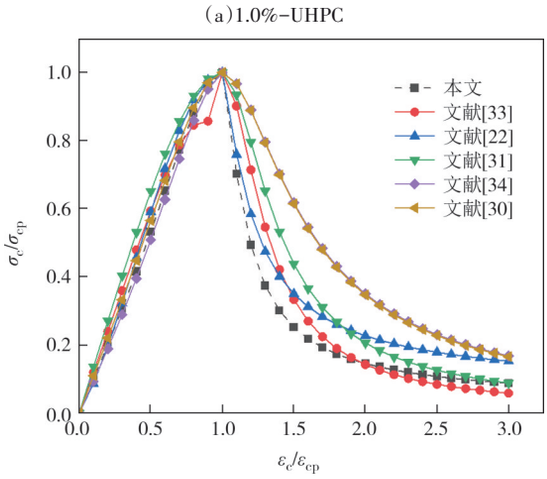
图 9 修正预测曲线与试验曲线对比

Fig. 9 Comparison between modified prediction curve and test curve

前三者的拟合效果较好,而后两者的试验结果拟合误差稍大.水胶比、辅助性胶凝材料掺量、纤维掺量、试验方法等都会对应力-应变全曲线测试结果造成影响.在这些误差影响下本修正模型依旧能够较好拟合文献[22,31,33]的应力应变曲线,导致拟合效果优劣的原因应该是水胶比:前三者试件的水胶比在0.14~0.16之间,均小于或等于本试验水胶比,而文献[30,34]中试验中试件的水胶比为0.19~0.20.由验证结果可以得出,修正模型对水胶比在0.14~0.16的UHPC具有较好的拟合效果.



(a)1.0%-UHPC



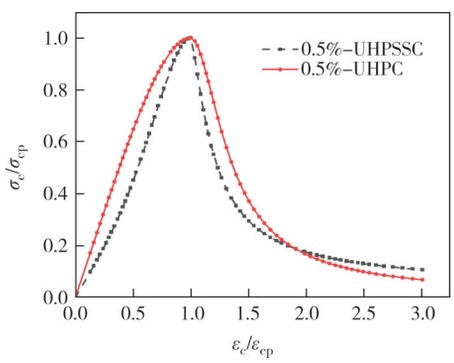
(b)2.0%-UHPC

图 10　模型验证

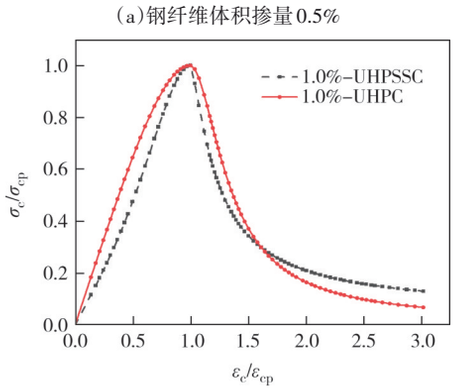
Fig. 10　Model verification

3.3　应力-应变全曲线对比

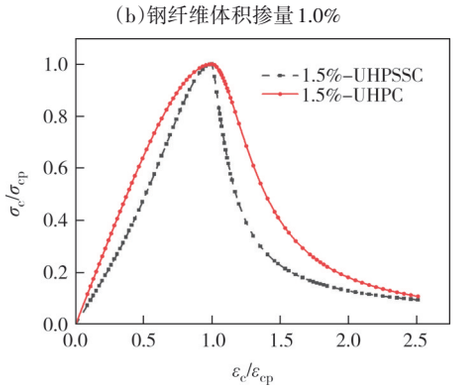
本节比较超高性能混凝土和超高性能海水海砂混凝土的应力-应变全曲线.在3.1节中的修正选用的是周传波模型,但是其钢纤维体积掺量为0%、1%、2%、3%,与本文试验有所区别;相较周传波模型,鞠彦忠模型的试验配合比与本文相似,并且拟合得到了钢纤维掺量与上升段参数和下降段参数的关系式,可以与本研究选取的变量对应比较,且周传波模型与鞠彦忠模型的拟合曲线比较接近.因此选用鞠彦忠模型的超高性能混凝土轴压应力-应变全曲线,与本章节测得的超高性能海水海砂混凝土受压应力-应变全曲线进行比较,具体见图11.



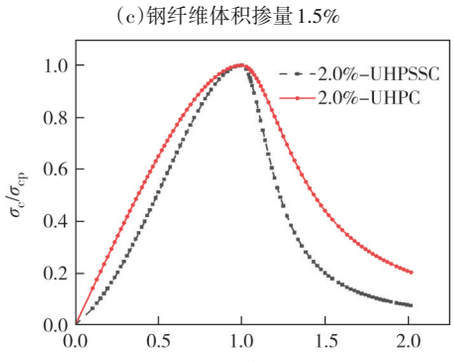
(a)钢纤维体积掺量0.5%



(b)钢纤维体积掺量1.0%



(c)钢纤维体积掺量1.5%



(d)钢纤维体积掺量2.0%

图 11　应力-应变全曲线对比

Fig.11　Comparison of complete stress-strain curve

通过归一化应力-应变全曲线对比图可以看出,海水和海砂的掺入,不影响UHPSSC的应力-应变全曲线发展规律,但是导致其上升段和下降段曲线均比普通UHPC更加陡峭.

4 结 论

1) 相比于无钢纤维UHPSSC,钢纤维掺量越高(不超过2.0%),轴压破坏后的试件更完整,UHPSSC的抗压强度和峰值应变、韧性指标均增大.通过线性回归得到纤维特征值与应力-应变全曲线中峰值应变和抗压强度的关系式;现有模型中Graybeal弹性模量预测公式能够更准确地预测UHPSSC的弹性模量.

2) 现有几种应力-应变全曲线模型对UHPSSC应力应变曲线上升段拟合效果较好,但对下降段尤其是后期两者差距较大;周传波模型和鞠彦忠模型的拟合效果要优于真有理分式模型,但是下降段后期差距仍较大.

3) 通过修正下降段形状参数,得到了能更好地拟合UHPSSC的应力-应变全曲线方程—Model-2-C,修正后的应力-应变全曲线方程可为UHPSSC的工程应用提供参考.通过模型验证,该修正模型对水胶比在0.14~0.16的UHPC具有较好的拟合效果.

4) 海水和海砂的掺入,不影响UHPSSC应力-应变全曲线的发展规律,但是其上升段和下降段曲线均比普通UHPC更加陡峭.

参考文献

[1] ZHAO Y F, HU X, SHI C J, et al. A review on seawater sea-sand concrete: Mixture proportion, hydration, microstructure and properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 295: 123602.

[2] 黄亮, 谢建和, 陆中宇. 海水海砂混凝土研究现状与应用前景[J]. 混凝土, 2020(9): 155-160.
HUANG L, XIE J H, LU Z Y. Research progress and prospects on seawater sea-sand concrete [J]. Concrete, 2020(9): 155-160. (in Chinese)

[3] LOU T J, LOPES S M R, LOPES A V. External CFRP tendon members: Secondary reactions and moment redistribution [J]. Composites: Part B, 2014, 57: 250-261.

[4] LI Y L, ZHAO X L, SINGH R R K. Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 977-993.

[5] DÖNMEZ A, RASOOLINEJAD M, BAŽANT Z P. Size effect on FRP external reinforcement and retrofit of concrete structures [J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(5): 04020056.

[6] 周俊龙, 欧忠文, 江世永, 等. 掺阻锈剂掺合料海水海砂混凝土护筋性探讨[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 69-74.
ZHOU J L, OU Z W, JIANG S Y, et al. Discussion of rebar-protection properties of seawater seasand concrete mixed with admixture and corrosion inhibitor [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 69-74. (in Chinese)

[7] HUANG B T, WU J Q, YU J, et al. Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC): Assessment and modeling of crack characteristics [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 140: 106292.

[8] LI L G, XIAO B F, FANG Z Q, et al. Feasibility of glass/basalt fiber reinforced seawater coral sand mortar for 3D printing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 1-12.

[9] VAFAEI D, HASSANLI R, MA X, et al. Sorptivity and mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with seawater and dredged sea-sand [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121436.

[10] 朱德举, 李龙飞, 周琳林, 等. 超高性能海水海砂混凝土的组成设计与纤维增强增韧[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 128-136.
ZHU D J, LI L F, ZHOU L L, et al. Composition design of ultra-high performance seawater sea-sand concrete and fiber strengthening and toughening [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 128-136. (in Chinese)

[11] EBEAD U, LAU D, LOLLINI F, et al. A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 152: 1-13.

[12] 李晃. 海水海砂超低水灰比水泥基材料的凝结硬化及钢筋腐蚀特性[D]. 长沙: 湖南大学, 2021: 95-96.
LI H. Hardening, corrosion properties of seawater sea sand cementitious based materials with ultra low water to binder ratio [D]. Changsha: Hunan University, 2021: 95-96. (in Chinese)

[13] 朱德举, 李龙飞, 郭帅成. 超高性能海水海砂混凝土性能的影响因素试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 187-195.
ZHU D J, LI L F, GUO S C. Research on influence factors of performance of ultra-high performance seawater sea-sand concrete [J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2022, 49(3): 187-195. (in Chinese)

[14] TENG J G, XIANG Y, YU T, et al. Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(14): 3100-3120.

[15] LI T Y, LIU X Y, ZHANG Y M, et al. Preparation of sea water sea sand high performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119114.

[16] WANG J Y, GUO J Y. Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic

emission techniques [J]. Cement and Concrete Composites, 2017,88: 17-18.

[17] RAJCZAKOWSKA M, NILSSON L, HABERMEHL-CWIRZEN K, et al. Does a high amount of unhydrated portland cement ensure an effective autogenous self-healing of mortar? [J]. Materials (Basel), 2019, 12(20): 3298.

[18] 卢佳. 海水海砂混凝土单轴受压应力-应变关系研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
LU J. Study on the stress-strain relationship of seawater sea-sand concrete under uniaxial compression [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)

[19] 张凯建, 肖建庄, 张青天. 海水海砂再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1738-1745.
ZHANG K J, XIAO J Z, ZHANG Q T. Complete stress-strain curves of seawater sea sand recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021,49 (12) : 1738-1745. (in Chinese)

[20] KRAHL P A, GIDRÃO G D M S, CARRAZEDO R. Cyclic behavior of UHPFRC under compression [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103363.

[21] KRAHL P A, CARRAZEDO R, DEBS M K E. Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation [J]. Engineering Structures, 2018, 170: 63-77.

[22] 池寅, 尹从儒, 徐礼华, 等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土单轴循环受压力学性能 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2331-2345.
CHI Y, YIN C R, XU L H, et al. Compressive mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced ultrahigh-perfromance concrete under cyclic compression [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49 (11) : 2331-2345. (in Chinese)

[23] 王龙, 池寅, 徐礼华, 等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能尺寸效应 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8): 781-788.
WANG L, CHI Y, XU L H, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8): 781-788.(in Chinese)

[24] 超高性能混凝土基本性能与试验方法:T/CBMF 37—2018 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
Basic properties and test methods of ultra-high performance concrete : T/ CBMF 37—2018 [S]. Beijing : China Building Materials Industry Press, 2018. (in Chinese)

[25] 活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Reactive powder concrete: GB / T 31387—2015 [S]. Beijing : Standard Press of China, 2015. (in Chinese)

[26] 张庆伟. 钢纤维种类及养护方式对RPC力学性能影响的研究[D]: 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018:6-8.
ZHANG Q W. Research of steel fiber types and curing methods on mechanical properties of RPC [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018:6-8. (in Chinese)

[27] ALSALMAN A, DANG C N, PRINZ G S, et al. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 918-928.

[28] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 369-376.
GUO X Y, KANG J F, ZHU J S. Constitutive relationship of ultra high performance concrete under uni-axial compression [J]. Journal of Southeast University(Nature Science), 2017, 47(2): 369-376. (in Chinese)

[29] GRAYBEAL B A. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(2): 146-152.

[30] 周传波. 活性粉末混凝土单轴抗压性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017:46-50.
ZHOU C B. Study on uniaxial compressive properties of reactive powder concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2017:46-50. (in Chinese)

[31] 鞠彦忠, 王德弘, 李秋晨, 等. 钢纤维掺量对活性粉末混凝土力学性能的影响 [J]. 实验力学, 2011, 26(3): 254-259.
JU Y Z, WANG D H, LI Q C, et al. Effect of steel fiber pattern on mechanical properties of reactive powder concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26 (3) : 254-259. (in Chinese)

[32] CARREIRA D J, CHU K H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1985, 82(6): 797-804.

[33] 安明喆, 宋子辉, 李宇, 等. 不同钢纤维含量RPC材料受压力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 34-38.
AN M Z, SONG Z H, LI Y, et al. Study on compressive mechanical properties of RPC materials with different steel fiber contents [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 34-38. (in Chinese)

[34] 黄政宇, 谭彬. 活性粉末钢纤维混凝土受压应力-应变全曲线的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 415-420.
HUANG Z Y, TAN B. Research on the stress-strain curves of reactive powder concrete with steel fiber under uniaxial compression [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, 29(5): 415-420. (in Chinese)