

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201803061

超轻质水泥基复合材料基本力学性能

杲晓龙, 王俊颜

(先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804)

摘 要: 为探究超轻质水泥基复合材料(ultra lightweight cement composite, ULCC)的基本力学性能及应力-应变曲线本构关系. 以粉煤灰空心微珠为唯一轻质微集料, 以水泥和硅灰为胶凝材料, 以高效减水剂和减缩剂为外加剂, 配制了钢纤维体积掺量为 1%, 表观密度介于 $1\,250 \sim 1\,550\text{ kg/m}^3$, 轴心抗压强度介于 $47.9 \sim 70.0\text{ MPa}$ 的 4 种不同密度等级的 ULCC. 对其分别进行单轴抗压和单轴抗拉试验, 分别研究了 ULCC 的轴心抗压和轴心抗拉力学性能, 测得了 ULCC 材料轴心抗压强度、轴心抗拉强度、弹性模量、泊松比及单轴抗压和单轴抗拉应力-应变曲线. 结果表明: ULCC 的抗压强度、抗拉强度和弹性模量均随密度的增加而增加; ULCC 的轴心抗压强度和弹性模量与密度呈较强线性相关性. 轴心抗拉试验结果表明 ULCC 抗拉应力-应变曲线关系呈现明显的峰后平台段, ULCC 材料具有良好的拉伸变形能力. 根据试验测得的 ULCC 单轴抗压和单轴抗拉应力-应变全曲线, 建立了 ULCC 单轴抗压和单轴抗拉的分段式应力-应变本构方程. 研究成果可为 ULCC 结构的设计和非线性有限元计算提供理论依据.

关键词: 超轻质水泥基复合材料; 应力-应变曲线; 本构关系; 抗压强度; 抗拉强度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0067-07

Basic mechanical properties of ultra lightweight cement composite

GAO Xiaolong, WANG Junyan

(Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties and constitutive relation of stress-strain for ULCC (ultra lightweight cement composite), four types of ULCC with different densities ranging from $1\,250\text{ kg/m}^3$ to $1\,550\text{ kg/m}^3$ and the corresponding compressive strengths ranging from 47.9 MPa to 70.0 MPa were developed in this paper. These ULCC consisted of microlightweight aggregates (cenospheres), cementing materials (cement and silica fume), concrete admixture (shrinkage reducing admixture and superplasticizer) and steel fiber with volume fraction of 1%. An experimental campaign including uniaxial compressive strength tests and uniaxial tensile strength tests was undertaken to investigate the uniaxial compressive and tensile mechanical properties, and the compressive strength, tensile strength, elastic modulus, poisson ratio, uniaxial compression stress-strain curves and uniaxial tension stress-strain curves were obtained. The results show that compressive strength, tensile strength, and elastic modulus all increased with the increasing of densities. The compressive strength and elastic modulus of ULCC were linearly related to densities. The segmented constitutive equations of ULCC under uniaxial compression and uniaxial tension were proposed based on the uniaxial compression stress-strain curves and uniaxial tension stress-strain curves obtained from the tests. The research results can provide theoretical basis for the design and nonlinear finite element calculation of ULCC structure.

Keywords: ultra lightweight cement composite; stress-strain curve; constitutive laws; compressive strength; tensile strength

轻质混凝土由于具有质量轻、节能环保、保温隔热性能好等优点^[1-4], 一直以来在桥梁、建筑和海洋等工程领域具有较强的竞争力^[5]. ULCC 是一种以粉煤灰空心微珠为唯一轻质微集料, 以水泥和硅灰

为胶凝材料, 以高效减水剂和减缩剂为外加剂, 配制而成的表观密度小于 $1\,500\text{ kg/m}^3$, 抗压强度大于 60 MPa 的超轻质水泥基复合材料. ULCC 材料较高的比强度(抗压强度/密度)、良好的冻融耐久性能、较低的热传导能力使得 ULCC 在桥梁、建筑和海洋工程等领域拥有广阔的应用前景(如: 桥面板、楼板和极地石油开采平台的双钢板-混凝土防护结构等)^[6]. 近年来, 已有部分学者在 ULCC 的制备手段和力学性能等方面进行了相关研究. 文献[7]分析了高效减缩剂(SRA)和纤维类型(聚乙烯纤维和钢

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51609172);
上海市浦江人才计划(16PJ1409900);
上海市科委项目(17DZ1204200)

作者简介: 杲晓龙(1990—), 男, 博士研究生;
王俊颜(1982—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

纤维)对 ULCC 抗弯强度的影响. 文献[8]提出一种根据目标重量求解 ULCC 配合比的理论计算模型, 该模型的提出为不同密度 ULCC 配合比的设计提供了有效的理论依据^[9]. 文献[10]配制了表观密度介于 1 154 ~ 1 457 kg/m³ 的 ULCC, 研究了不同密度 ULCC 的力学性能包含抗压强度、抗弯强度, 同时也对 ULCC 材料的热传导率进行了研究. 文献[11 – 12]分别研究了不同低温环境(0 ~ 60 ℃)和高温环境下(1 000 ℃) ULCC 的力学性能.

上述对 ULCC 力学性能方面的研究大多集中在力学性能指标方面, 较少学者对 ULCC 材料的单轴抗压和单轴抗拉的本构关系进行研究, 对单轴受压和单轴受拉作用下 ULCC 力学破坏机理的相关报道也较少. 针对上述问题, 本文根据文献[12]中提出的不同密度 ULCC 的配合比计算方法, 设计并配制了钢纤维体积掺量为 1%, 表观密度介于 1 250 ~ 1 550 kg/m³ 的 4 种不同密度等级的 ULCC. 分别对其进行了轴心抗压和轴心抗拉试验, 研究了不同密度等级 ULCC 的力学性能指标及单轴拉压应力 – 应变曲线关系, 阐述了 ULCC 轴压和轴拉作用下的破

坏机理, 并根据试验结果初步建立了 ULCC 单轴抗压和单轴抗拉的力学本构方程. 为 ULCC 结构设计和非线性数值分析提供了材性依据和理论基础.

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

本文研究的 ULCC 包含钢纤维(力学性能见表 1)、水、52.5 普通硅酸盐水泥、硅灰、粉煤灰空心微珠(简称“漂珠”)及化学外加剂. 漂珠是一种能浮于水面的粉煤灰空心球, 颗粒直径约为 10 ~ 300 μm, 壁厚为颗粒直径的 2.5% ~ 10.5%. 本文配制 ULCC 所用漂珠的密度为 870 kg/m³, 所用减缩剂和减水剂的型号分别为 Eclipse® Floor 和 ADVA® 181.

表 1 钢纤维的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the steel fibre				
直径/mm	长度/mm	长细比	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
0.16	13	81.3	2 500	200

本文配制了 28 d 表观密度介于 1 250 ~ 1 550 kg/m³ 的 4 种不同密度等级的 ULCC, 其配合比见表 2.

表 2 不同密度等级 ULCC 材料的配合比

Tab. 2 Mix proportions of ULCC with different densities									kg/m ³
ULCC 类型	28 d 密度	拌和水	水泥	硅灰	减水剂	漂珠	钢纤维	减缩剂	消泡剂
U1250	1 257.61	236.98	499.55	55.52	8.21	366.33	73.64	15.48	1.89
U1350	1 355.79	240.08	611.71	67.95	8.33	345.41	73.81	6.62	1.89
U1450	1 458.23	264.92	716.76	79.64	9.21	307.05	74.84	3.84	1.92
U1550	1 552.14	283.70	801.31	88.52	8.51	290.61	73.78	3.81	1.91

1.2 试件设计

根据表 2 给出的 4 种密度等级 ULCC 的配合比设计了 4 组试件, 每组试件包含 3 个圆柱体试件(尺寸: φ100 mm × 200 mm)和 3 个哑铃式试件(尺寸见图 1).

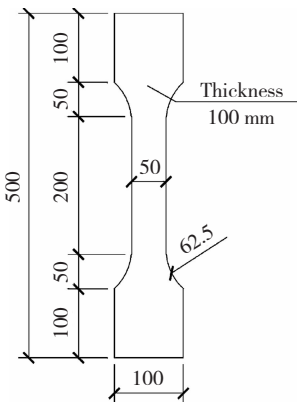


图 1 ULCC 轴拉试件几何尺寸

Fig. 1 Dimension of ULCC specimen for axis tension test

其中圆柱体试件用于 ULCC 的单轴抗压试验, 哑铃式试件用于 ULCC 的单轴抗拉试验. 试件制作

程序为: 启动搅拌机 → 投入水泥、硅灰、漂珠 → 加水 and 减水剂 → 搅拌 3 ~ 5 min (物料达到流化状态 → 投入纤维、继续搅拌 2 min 以上) → 浇筑. 浇筑时用振捣棒轻微振捣, 抹平, 并用塑料薄膜覆盖. 室温下静置 24 h 后拆模, 采用标准养护至 28 d 后进行相关试验.

1.3 加载装置和试验方法

采用 300 t 的液压伺服材料试验机对圆柱体试件进行抗压试验加载, 加载装置如图 2 所示. 为了获得试验过程中试件的应力 – 应变全过程曲线, 采用位移加载的控制制度, 加载速率为 0.02 mm/min. 由于 ULCC 的抗压破坏属于脆性破坏, 混凝土应变片较难测量出峰值段后的数据, 而直接架设的位移计初始测量阶段会存在一定的尾端接触效应, 试验中通过沿圆柱体对称分布的 4 个位移计和试件中部的纵向混凝土应变片来共同测量试件轴向变形, 之后将两组数据进行整合以消除上述误差. 为了获得 ULCC 材料的泊松比, 在试件中部粘贴横向混凝土应变片来测量试件的横向变形.



图 2 ULCC 抗压试验装置

Fig.2 Test set-up for ULCC compression test

抗拉试验加载装置见图 3,采用 30 t 微机控制电子伺服万能试验机对抗拉试件进行加载,加载制度和加载速率同轴压试验.在试件中间纯拉段安装两个夹具,两个夹具中间的距离取 150 mm,即为轴拉试件的测试标距,试验中通过标距范围内的 4 根精度为 0.000 1 mm 的光栅位移传感器来测量试验过程中竖向变形.试验过程中采用裂缝测宽仪(精度 0.01 mm)测量试件在抗拉试验过程中的裂缝发展情况.

2 结果与分析

2.1 抗压试验结果与分析

2.1.1 试件抗压破坏过程

加载初期,试件处于线弹性阶段,试件的应力与应变基本呈线弹性关系.试件应力达到峰值应力的

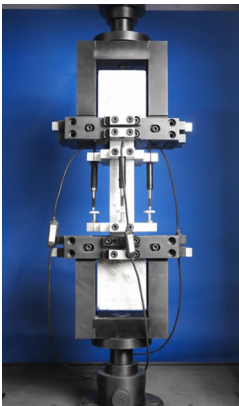


图 3 ULCC 抗拉试验装置

Fig.3 Test set-up for ULCC tension test

80% 左右时,由于试件的内部出现微小裂纹,试件的刚度不断减小,应力 - 应变关系呈曲线变化.接近峰值应力时,试件表面未出现肉眼可见裂缝,峰值应力后,由于试件内部出现断裂面,试件的应力急速下降,但由于钢纤维桥接作用,试件应力并未出现持续下降,应力下降至反弯点处,应力下降速率达到最大值,此后随着应变的增加,钢纤维被逐渐拔出,试件的应力进入缓慢下降阶段,试件内部裂缝逐渐发展至试件表面.试验结束后发现,试件受压面的中部产生了较明显的压缩变形,但试件依旧保持较好的整体性,并未出现基体剥落或破碎.

2.1.2 抗压应力 - 应变关系曲线

整合位移计和混凝土应变片测得的各试件轴向变形数据,得到不同密度的 ULCC 抗压应力 - 应变关系曲线见图 4.

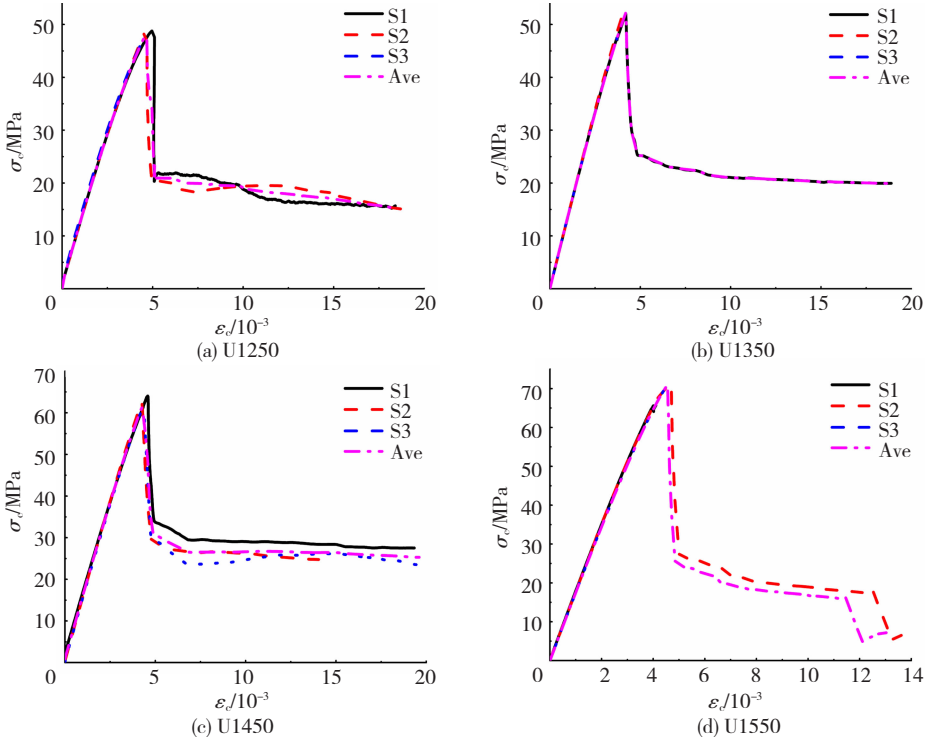


图 4 不同密度等级 ULCC 的抗压应力 - 应变曲线

Fig.4 Compressive stress-strain curves of ULCC with different densities

其中 S1 ~ S3 代表各组 3 个试件的测试结果, Ave 代表 3 组曲线的平均值. 由图 4 可知, 各组 3 个试件的上升段基本重合, 下降段具有一定的离散型, 这可能是由于基体中各方向纤维分布的不均匀性造成的. 根据各组试件的应力 - 应变关系, 得到的各组试件抗压强度平均值及对应的应变平均值见表 3. 图 5 给出了 ULCC 轴向抗压强度随表观密度的变化规律, 可以看出 ULCC 的轴向抗压强度与表观密度呈很强的线性相关性, 相关系数为 0.98.

表 3 ULCC 压应力 - 应变本构关系拟合结果
Tab.3 Fitting results of ULCC compression stress-strain constitutive relation

Type	$\varepsilon_{ck}/10^{-6}$	f_{ck}/MPa	E_c/MPa	ν	a	η_1	η_2	E_{cs}/MPa
U1250	4 672	47.86	12 021	0.25	1.50	1.12	0.44	426
U1350	4 192	52.27	13 839	0.24	1.51	1.19	0.46	301
U1450	4 260	61.23	15 589	0.24	1.47	1.18	0.46	171
U1550	4 558	70.99	17 336	0.25	1.47	1.09	0.33	1 274
Ave	—	—	—	—	1.49	1.15	0.42	543

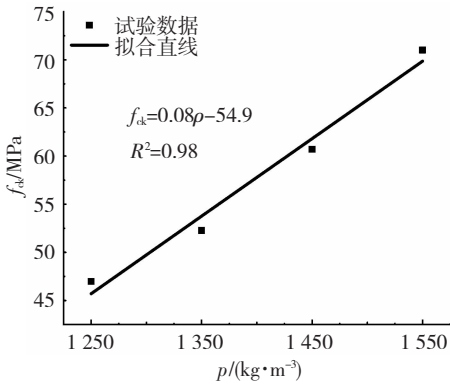


图 5 ULCC 抗压强度与密度的关系

Fig.5 Relationship between compressive strength and density of ULCC

2.1.3 弹性模量和泊松比

弹性模量是混凝土力学性能的重要指标, 它反映了混凝土所受应力与所产生应变之间的关系, 是计算混凝土结构变形、裂缝开展和温度应力所必需的参数之一^[13]. 参考文献[12 - 15]中弹性模量的计算方法, 试验中根据各组试件中的平均应力 - 应变曲线上 40% 的峰值应力及对应的轴向应变和横向应变分别计算得到各组 ULCC 材料的弹模和泊松比, 计算结果见表 3. 由表 3 可知 ULCC 材料的泊松比 ν 介于 0.24 ~ 0.25, 略高于普通混凝土的泊松比, 表明钢纤维的连接作用提高了 ULCC 的压缩韧性. 图 6 给出了 ULCC 材料的弹性模量与密度的变化关系, 从图 6 可看出, ULCC 的弹性模量随密度的增加而增加, 且呈明显的线性相关性, 相关系数为 0.99.

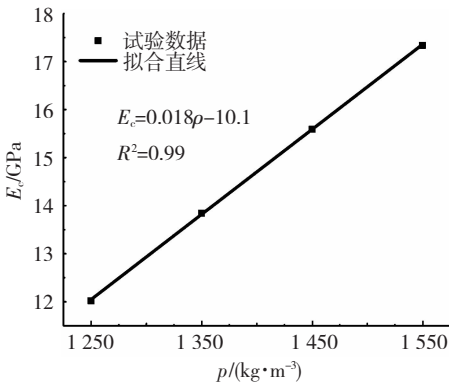


图 6 ULCC 弹性模量与密度的关系

Fig.6 Relation between modulus of elasticity and density of ULCC

2.2 抗拉试验结果与分析

2.2.1 试件抗拉破坏历程

峰值拉应力之前, 试件处于线弹性阶段, 试件的应力随着应变的增加线性增加. 在此阶段, 拉应力主要由 ULCC 基体承担. 达到峰值应力后, 基体内部出现第一条裂缝, 裂缝位置处的拉应力由基体和钢纤维间的黏结力承担, 但由于基体和钢纤维间的黏结力小于基体本身的开裂强度, 因而拉应力 - 应变曲线在峰值点后会出现一个快速下降段. 随着应变的增加, 当纤维的尾端效应较为明显时, 应力会出现一定程度的增加, 直到第一条裂缝位置处的纤维被完全拔出, 之后随着应变的进一步增加, 基体中裂缝不断发展, 应力进入缓慢的下降段. 反之当纤维的尾端效应较弱时, 在快速下降段之后, 应力直接进入一个缓慢的下降段, 直至试件发生完全破坏.

2.2.2 抗拉应力 - 应变曲线

测得的不同密度的 ULCC 抗拉应力 - 应变关系曲线见图 7, 其中 S1 ~ S3 代表各组 3 个试件的测试结果, Ave 代表 3 组曲线的平均值. 考虑到实际工程应用, 本文仅给出 0 ~ 0.005 的抗拉应力 - 应变曲线. 从图 7 可看出各组 ULCC 试件在达到各自峰值拉应力之前, 应力 - 应变曲线基本重合, 但各组中 3 个试件对应的峰值应力和峰后段数据具有较明显的离散性, 这是由于 ULCC 基体内各方向纤维分布的不均匀性及其基体材料的离散性造成的.

参考文献[14]中法国规范对超高性能混凝土抗拉强度的定义, 对于有明显峰后强化段的曲线, 取峰后强化段峰值点对应的应力作为抗拉强度, 对于无峰后强化段的曲线, 取裂缝宽度达到 0.3 mm 时对应的应力作为抗拉强度. 根据试验中对 ULCC 抗拉试件表面裂缝宽度的记录结果, 各组 ULCC 抗拉试件裂缝宽度达到 0.3 mm 时, 拉应变处于 0.002 左右. 因此本文选择 0.002 对应的应力作为 ULCC 的抗拉强度. 根据各组试件的平均应力 - 应变曲线,

提取各组试件的抗拉强度,根据平均应力 - 应变关系曲线上 40% 的峰值应力及对应的应变计算得到 ULCC 材料的抗拉弹性模量,各组试件的抗拉强度和抗拉弹性模量见表 4。

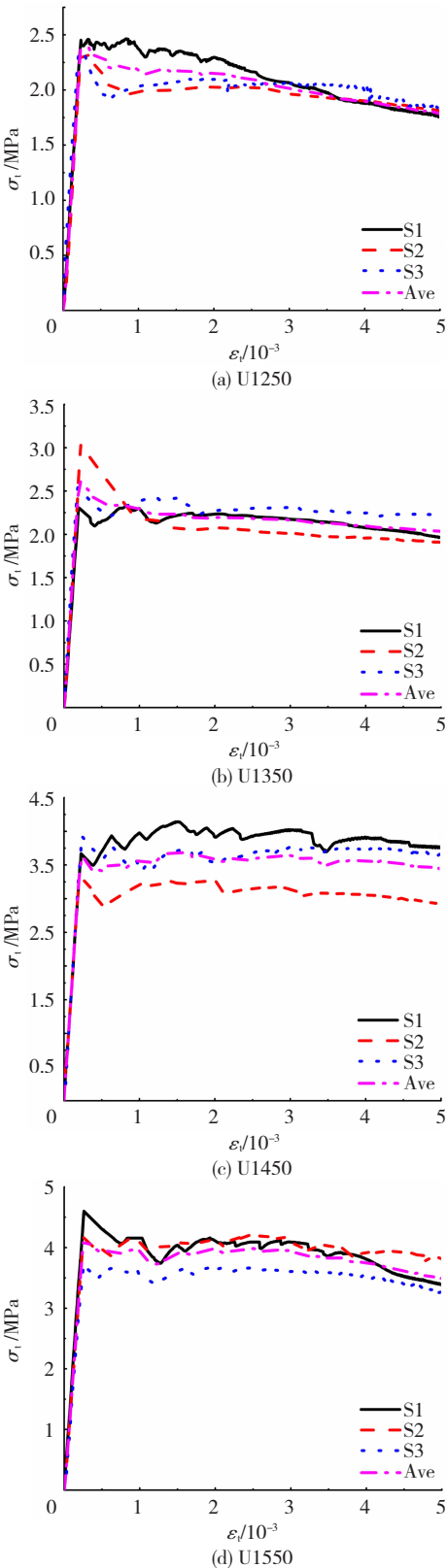


图 7 不同密度 ULCC 抗拉应力 - 应变曲线
Fig. 7 Tensile stress-strain curves of ULCC with different densities

表 4 ULCC 抗拉应力 - 应变本构关系拟合结果

Tab.4 Fitting results of ULCC tension stress-strain constitutive relation

Type	$\varepsilon_{tk}/10^{-6}$	f_{tk}/MPa	E_t/MPa	E_{ts}/MPa
U1250	206	2.14	10 403	113.29
U1350	173	2.22	12 733	62.64
U1450	233	3.65	15 074	73.62
U1550	250	3.98	16 468	187.62
Ave	216			109.29

3 本构方程的建立

3.1 单轴抗压本构方程的建立

根据试验测得的 ULCC 抗压应力 - 应变曲线关系,结合 ULCC 试件单轴抗压破坏机理,参考常见的混凝土抗压应力 - 应变模型^[15]. 本文提出如图 8 所示的 ULCC 抗压力学本构模型,上升段曲线采用四次多项式形式,下降段采用双折线形式,拟合得到的分段式曲线方程:

OA 段($\varepsilon < \varepsilon_{ck}$)

$$\sigma_c = f_{ck} \left[\frac{a - 2}{\varepsilon_{ck}^3} \varepsilon_c^3 + \frac{3 - 2a}{\varepsilon_{ck}^2} \varepsilon_c^2 + \frac{a}{\varepsilon_{ck}} \varepsilon_c \right], \quad (1)$$

AB 段($\varepsilon_{ck} < \varepsilon \leq \eta_1 \varepsilon_{ck}$)

$$\sigma_c = f_{ck} \left[1 - \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ck}}{(\eta_1 - 1) \varepsilon_{ck}} (1 - \eta_2) \right], \quad (2)$$

BC 段($\eta_1 \varepsilon_{ck} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}$)

$$\sigma_c = \eta_2 f_{ck} - E_{cs} (\varepsilon_c - \eta_1 \varepsilon_{ck}). \quad (3)$$

式中: ε_{ck} 和 f_{ck} 分别为抗压峰值应力及对应的抗压峰值应变, $\eta_1 \varepsilon_{ck}$ 和 $\eta_2 f_{ck}$ 分别为曲线下降段反弯点对应的压应力和压应变, ε_{cu} 为极限压应变. 根据试验结果建议 ε_{cu} 取值 0.01.

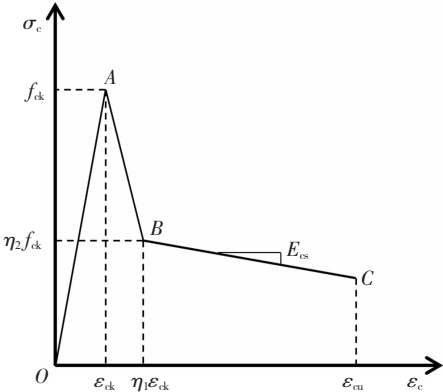


图 8 ULCC 单轴抗压应力 - 应变曲线模型

Fig. 8 Stress-strain model of ULCC in uniaxial compression

利用最小二乘法的原理,对曲线上升段和下降段分别采用多项式和线性进行拟合,限于篇幅,本文仅给出 U1250 和 U1550 两种平均曲线和拟合曲线的对比结果,见图 9. ε_{ck} 和 f_{ck} 可从压应力 - 应变关

系曲线中获得,根据 OA 段、 AB 段和 BC 段的拟合结果,由式(1) ~ 式(3) 计算出来的参数 a 、 η_1 、 η_2 和 E_{cs} 如表 3 所示. 从表 2、3 可看出 ULCC 的密度从 $1\,257.61\text{ kg/m}^3$ 增加至 $1\,552.14\text{ kg/m}^3$,增加了 23.42%,对应的抗压强度从 47.86 MPa 增加至 70.99 MPa ,增加了 48.3%,确定抗压本构方程的参数 a 、 η_1 、 η_2 和 E_{cs} 的平均值分别为 1.49、1.15、0.42 和 543 MPa .

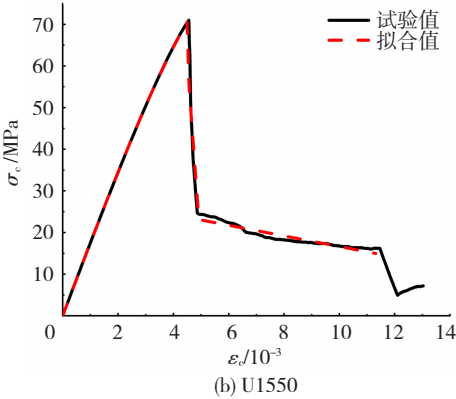
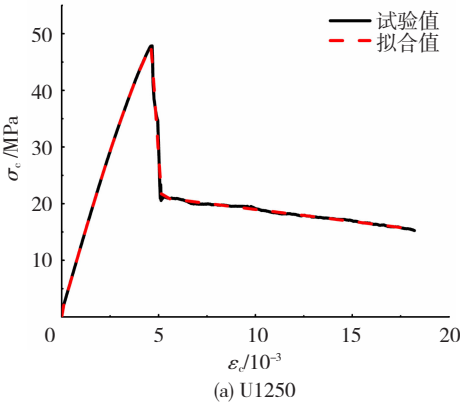


图 9 U1250 和 U1550 受压模型拟合曲线与试验曲线对比
Fig. 9 Comparison between fitting curve and trial curve for compressive model of U1250 and U1550

3.2 单轴抗拉本构方程的建立

参考文献[14]中给出的超高性能纤维混凝土的抗拉力学本构模型,本文提出了如图 10 所示的 ULCC 抗拉力学本构模型,模型由上升段、平台段和下降段 3 个线性段组成,对应的曲线方程:

OC 段 ($\varepsilon \leq \varepsilon_{ct}$)

$$\sigma_t = E_t \varepsilon_t, \tag{4}$$

CD 段 ($\varepsilon_{ik} < \varepsilon \leq 0.002$)

$$\sigma_t = f_{tk}, \tag{5}$$

DE 段 ($\varepsilon_{2000} < \varepsilon \leq \varepsilon_{tu}$)

$$\sigma_t = f_{tk} - E_{ts}(\varepsilon_t - 0.002). \tag{6}$$

式中: ε_{ik} 和 f_{tk} 分别为抗拉强度及对应的抗拉应变, ε_{ik} 为拉应力 - 应变曲线直线上升段末端对应的应变,即为轴拉作用下 ULCC 基体开裂对应的应变, ε_{2000} 为 0.002 的拉应变, ε_{tu} 为极限拉应变. 根据试验

结果并结合实际工程的应用,本文建议 ε_{tu} 取值 0.005.

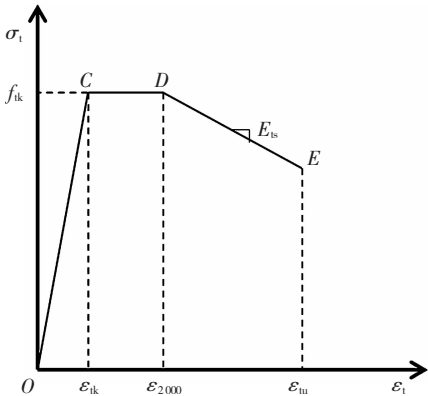


图 10 ULCC 单轴抗拉应力 - 应变曲线模型
Fig. 10 Stress-strain model of ULCC in uniaxial tension

利用最小二乘法的原理对受拉应力 - 应变关系曲线的 3 个阶段进行线性拟合. 限于篇幅,本文仅给出 U1250 和 U1350 两组试验的平均曲线和拟合曲线的对比结果,见图 11. 不同密度等级的 ULCC 的抗拉应力 - 应变本构关系的拟合结果见表 4,从表 2 和 4 可看出 ULCC 的密度从 $1\,257.61\text{ kg/m}^3$ 增加至 $1\,552.14\text{ kg/m}^3$,增加了 23.42%,对应的抗拉强度从 2.14 MPa 增加至 3.98 MPa ,增加了 85.98%.

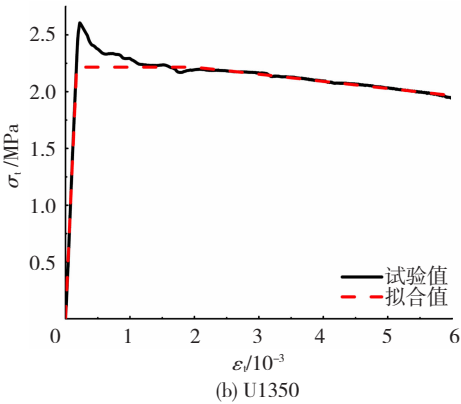
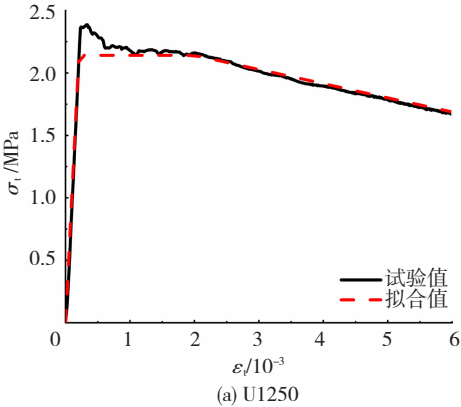


图 11 U1250 和 U1350 抗拉模型拟合曲线与试验曲线对比
Fig. 11 Comparison between fitting curve and trial curve for tensile model of U1250 and U1350

4 结 论

1)以粉煤灰空心微珠为唯一轻质微集料,以水泥和硅灰为胶凝材料,以高效减水剂和减缩剂为外加剂,配制了钢纤维体积掺量为 1%,表观密度介于 1 250 ~1 550 kg/m³,轴心抗压强度介于 47.9 ~ 70.0 MPa的 4 种不同密度等级的超轻质水泥基复合材料.

2) ULCC 的圆柱体轴心抗压强度、轴心抗拉强度和弹性模量均随密度的增加而增加,抗压强度和弹性模量与密度具有明显的线性相关性.

3) ULCC 抗拉应力 - 应变曲线关系呈现明显的峰后平台段,表明 ULCC 材料具有良好的拉伸变形能力.

4) 根据实测的拉、压应力 - 应变曲线,建立了 ULCC 单轴抗压和单轴抗拉的分段式应力 - 应变本构方程,为 ULCC 在工程上的广泛应用提供了必要的试验结果和理论依据.

参考文献

[1] LIBRE N A, SHEKARCHI M, MAHOUTIAN M, et al. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced light-weight aggregate concrete made with natural pumice[J]. Construction & Building Materials,2011,25(5):2458

[2] SURANENI P, ANLEU P C B, FLATT R J. Factors affecting the strength of structural lightweight aggregate concrete with and without fibers in the 1 200 - 1 600 kg/m³ density range[J]. Materials & Structures,2016,49(1):677

[3] 权长青,焦楚杰,苏永亮,等. 钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2018,35(5):1306

QUAN Changqing, JIAO Chujie, SU Yongliang, et al. The influence of steel fibre and haydite adding content on the basic mechanical properties of lightweight concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(5):1306

[4] 于蕾,傅玉勇,张君,等. 泡沫混凝土与钢丝粘结性能试验与模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(6):119

YU Lei, FU Yuyong, ZHANG Jun, et al. Test and simulation on pull-out behavior of steel wire in foam concrete [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2016,48(6):119

[5] 王海涛,王立成. 钢纤维改善轻骨料混凝土力学性能的试验研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(2):188

WANG Haitao, WANG Licheng. Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials,2007,10(2):188

[6] YAN Jiabao, WANG Junyan, LIEW J Y R, et al. Applications of ultra-lightweight cement composite in flat slabs and double skin composite structures[J]. Construction & Building Materials,2016,111(5):774

[7] WANG Junyan, CHIA K S, LIEW J Y R, et al. Flexural performance of fiber reinforced ultra-lightweight cement composites with low fiber content[J]. Cement & Concrete Composites,2013,43(6):39

[8] WANG Junyan, YANG Yi, LIEW J Y R, et al. Method to determine mixture proportions of workable ultra lightweight cement composites to achieve target unit weights[J]. Cement & Concrete Composites,2014,53(10):178

[9] HANIF A, LU Zeyu, LI Zongjin. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites-A review [J]. Construction & Building Materials,2017,144(4):373

[10] WU Yunpeng, WANG Junyan, MONTEIRO P J M, et al. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings [J]. Construction & Building Materials,2015,87(7):100

[11] LIU Xuemei, ZHANG Minhong, CHIA K S, et al. Mechanical properties of ultra-lightweight cement composite at low temperatures of 0 to 60℃ [J]. Cement & Concrete Composites,2116,73(10):289

[12] HUANG Zhenyu, LIEW J Y R, LI Wei. Evaluation of compressive behavior of ultra-lightweight cement composite after elevated temperature exposure[J]. Construction & Building Materials,2017,148(9):579

[13] 徐世烺,蔡向荣,张英华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力 - 应变全曲线试验测定与分析[J]. 土木工程学报,2009,42(11):79

XU Shilang, CAI Xiangrong, ZHANG Yinghua. Experimental measurement and analysis of the axial compressive stress-strain curve of ultra high toughness cementitious composites [J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(11):79

[14] Ultra-high performance fiber reinforced concretes interim recommendations [S]. France:AFGC,2002;86

[15] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003;20

GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2003;20

(编辑 赵丽莹)