

纤维特征参数对 HES-HDC 单轴拉伸性能的影响及拉伸韧性评价方法

杨家盛¹, 邓明科^{1†}, 张晴晴¹, 邓友生², 张阳玺¹, 范洪侃³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 西安五和建筑科技研究院有限公司, 陕西 西安 710055)

摘要:为探究高早强高延性混凝土(HES-HDC)在不同 PE 纤维直径与体积率下的单轴拉伸力学性能,设计了 17 组薄板试件进行单轴拉伸试验,研究 PE 纤维直径(22 μm 和 25 μm)及体积率(1.00%、1.25% 和 1.50%)对不同龄期(2 h、24 h、7 d、28 d 和 56 d)HES-HDC 应力-应变曲线、拉伸强度和应变的影响;根据试验结果提出了 HDC 拉伸韧性评价方法.结果表明:在拉伸荷载作用下,HES-HDC 应力-应变曲线展示出应变强化特性,破坏过程呈多裂缝开展;2 h 龄期时,HES-HDC 拉伸强度与应变达到 3.29 MPa 和 0.88% 以上;28 d 时,HES-HDC 拉伸应变可保持在 1.28% 以上;当纤维体积率为 1.00% 时,小直径纤维对试件拉伸应变有利,而大直径纤维对试件拉伸强度有利;综合大直径纤维试件拉伸强度与应变,纤维最佳体积率为 1.25%.提出的拉伸韧性评价方法可评价 HDC 薄板受拉全过程的韧性.随龄期的增长,HES-HDC 拉伸韧性指数降低,而拉伸强度系数提高;小直径纤维试件的拉伸韧性高于大直径纤维试件;纤维体积率为 1.25% 时试件拉伸韧性最大.

关键词:高早强高延性混凝土;纤维直径;纤维体积率;单轴拉伸;抗拉强度;拉伸韧性

中图分类号:TU528.58

文献标志码:A

Effect of Fiber Characteristics Parameters on Uniaxial Tensile Properties of HES-HDC and Evaluation Method of Tensile Toughness

YANG Jiasheng¹, DENG Mingke^{1†}, ZHANG Qingqing¹, DENG Yousheng², ZHANG Yangxi¹,
FAN Hongkan³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Architecture & Civil Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China;

3. Xi'an Wuhe Building Technology Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710055, China)

Abstract: To investigate the uniaxial tensile mechanical properties of high-early-strength high ductility concrete (HES-HDC) at different PE fiber diameters and volume fractions, 17 groups of thin-plate specimens were designed and loaded under uniaxial tensile tests. The effects of PE fiber diameters (22 μm and 25 μm) and fiber

* 收稿日期:2023-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878545), National Natural Science Foundation of China (51878545); 西安市重大科技创新计划项目(20191522415KYPT015JC017), Xi'an Science and Technology Bureau (20191522415KYPT015JC017)

作者简介:杨家盛(1995—),男,广东惠州人,西安建筑科技大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: dengmingke@126.com

volume fractions (1.00%, 1.25%, and 1.50%) on stress-strain curve, tensile strength, and strain of HES-HDC specimens at different curing ages (2 h, 24 h, 7 d, 28 d and 56 d) were investigated. A tensile toughness evaluation method suitable for the characteristics of HDC was proposed based on the test results. The results show that the HES-HDC stress-strain curve exhibits strain-hardening characteristics under uniaxial tensile loading, and the failure process is carried out with multiple cracks. The tensile strength and strain of HES-HDC at 2 h reach over 3.29 MPa and 0.88%, respectively, and the tensile strain at 28 d could remain more than 1.28%. When the fiber volume fraction is 1.00%, small-diameter fiber is beneficial to the tensile strain of specimens, while large-diameter fiber is beneficial to the tensile strength of specimens. Considering the tensile strength and strain of specimens with large-diameter fiber, the optimal fiber volume fraction is 1.25%. The proposed tensile toughness evaluation method can evaluate the tensile toughness of HDC during its whole loading process. In addition, the tensile toughness index of HES-HDC decreased with the increase of curing age, while the tensile strength coefficient increased. The tensile toughness of specimens with small-diameter fiber is higher than that of specimens with large-diameter fiber. The tensile toughness of specimens is the highest when the fiber volume fraction is 1.25%.

Key words: high-early-strength high ductility concrete; fiber diameter; fiber volume fraction; uniaxial tension; tensile strength; tensile toughness

混凝土是当今世界用途最广、用量最大的建筑材料^[1],但混凝土为脆性材料,抗拉强度低、韧性差,低应力下即会发生开裂.同时由于混凝土固有的应变软化特性导致裂纹极易发展成为宏观裂缝.因此,许多建筑结构性能的衰退及使用寿命的终结与混凝土的开裂及其脆性特征有关.为克服混凝土脆性与应变软化缺陷,基于微观力学设计、具有应变强化特性的高延性混凝土(high ductile concrete, HDC)应运而生,其在拉伸荷载作用下展示出高延性与高韧性,具有优异的力学性能和耐久性^[2-4].目前,HDC主要应用于公路路面的修复^[5]、砌体结构的加固^[6]以及混凝土桥面板的连接缝^[7-8]等.然而,结构的维修与养护会导致使用的长时间中断,因此,制备高早强高延性混凝土(high-early-strength high ductility concrete, HES-HDC)用于结构的快速修复具有重要意义.

HES-HDC指通过加入早强剂或早强型水泥,或两者复配到HDC材料组分中,经优化设计而成的新型水泥基复合材料,具有早期高强度、高韧性和高抗裂性等优点^[9-12].近年来,作者课题组采用早强型硫铝酸盐水泥(SAC)设计出高早强基体,并在此基础上加入纤维研制出2 h即可满足修复使用需求的HES-HDC^[11].HDC优异的力学性能与其内部乱向分布的纤维种类及特征参数有关;范洪侃^[11]和邓涵文^[12]研究了不同国产纤维类型对HES-HDC应变强化行为的影响,结果表明:相比PVA纤维,PE纤维增

强HES-HDC受拉具有更明显的应变强化特性、更高的强度与变形能力.Yu等^[13]在Ranade等研究成果^[14-15]的基础上,采用直径更小、长径比更大的PE纤维制备出了具有显著应变强化和多缝开裂特征的UHP-ECC,其抗拉强度与应变分别达到20 MPa和8.7%.Zhang等^[16]文献综述表明PE纤维直径在12~38 μm ,纤维体积率在1.0%~2.5%,对ECC拉伸力学性能的提升有利.Kamal等^[17]研究了不同PE纤维体积率(0.5%、1.0%和1.5%)对UHP-SHCC拉伸力学性能的影响,结果表明:随纤维体积率增加,试件抗拉强度与拉伸应变显著提高,裂缝数量增多.综上所述,1)PE-HDC的拉伸性能优于PVA-HDC,且其显著的应变强化特性有助于获得高拉伸强度的同时具备良好的控裂能力;2)纤维特征参数中直径(长径比)和纤维体积率对拉伸性能影响最大.

此外,HDC应变强化和多缝开裂行为主要通过单轴拉伸试验或四点弯曲试验考察,而单轴拉伸试验可得到拉伸弹性模量、开裂应力-应变、峰值应力-应变以及裂缝宽度等参数的同时,还能更真实有效地评定HDC应变强化特性^[18-19]、观测多裂缝开展的过程,因此可认为单轴拉伸试验为HDC基本性能测定的最直接、最有效的方法.然而,目前纤维混凝土韧性的评定主要通过四点弯曲试验,鲜有对单轴拉伸试验提出合适的韧性评价方法.基于此,本文在探究2种PE纤维直径(22 μm 和25 μm)及3种纤维体

积率(1.00%、1.25%和1.50%)对HES-HDC拉伸力学性能影响的基础上,根据试验结果提出了HDC拉伸韧性评价新方法,可评价HDC薄板受拉全过程的韧性,并基于该方法评估了龄期、纤维直径及体积率对HES-HDC拉伸韧性的影响.

1 试验概况

1.1 方案设计

试验共设计了17组HES-HDC薄板单轴拉伸试件,每组制作3个相同的试样.如表1所示,试件命名包括3部分:养护龄期、纤维直径和纤维体积率;其中,D22和D25分别表示纤维直径为22 μm和25 μm;第二部分的数字表示纤维的体积率;第三部分的2 h、24 h、7 d、28 d和56 d表示试件的养护龄期分别为2 h、24 h、7 d、28 d和56 d.其中,纤维直径为25 μm及纤维体积率为1.00%的试件为对照组,并研究至56 d龄期,其余试件为仅研究至28 d龄期的参

表1 测试试件名称汇总

Tab.1 Summary of specimens' name

龄期	不同PE纤维直径及体积率对应的试件名称			
	22 μm		25 μm	
	1.00%	1.00%	1.25%	1.50%
2 h	D22-1.00-2 h	D25-1.00-2 h	D25-1.25-2 h	D25-1.50-2 h
24 h	D22-1.00-24 h	D25-1.00-24 h	D25-1.25-24 h	D25-1.50-24 h
7 d	D22-1.00-7 d	D25-1.00-7 d	D25-1.25-7 d	D25-1.50-7 d
28 d	D22-1.00-28 d	D25-1.00-28 d	D25-1.25-28 d	D25-1.50-28 d
56 d	—	D25-1.00-56 d	—	—

单轴拉伸试件选用日本土木工程师学会(JSCE)^[20]推荐的狗骨构造,试件尺寸及加载装置如图1所示.试件两端部均粘贴30 mm×60 mm的碳纤维布,防止加载时夹具与试件接触部位因应力集中而发生断裂.试验设备为WDW-100 kN电子万能试验机,试件采用位移控制模式加载,速率为0.2 mm/min.U形夹式引伸计安装在试件中部以记录试件在单轴拉伸荷载作用下测距段的变形.

1.2 原材料

本试验采用的胶凝材料有R·SAC 42.5硫铝酸盐水泥、P·O 42.5普通硅酸盐水泥、I级粉煤灰、S95级矿物掺合料;骨料为石英砂,最大粒径为0.83 mm;外加剂有聚羧酸高效减水剂、消泡剂和羟丙基甲基纤维素(HPMC),黏度为40 000 mPa·s;拌和水为饮用自来水;HES-HDC基体配合比为 $m_{\text{硫铝酸盐水泥}}:$

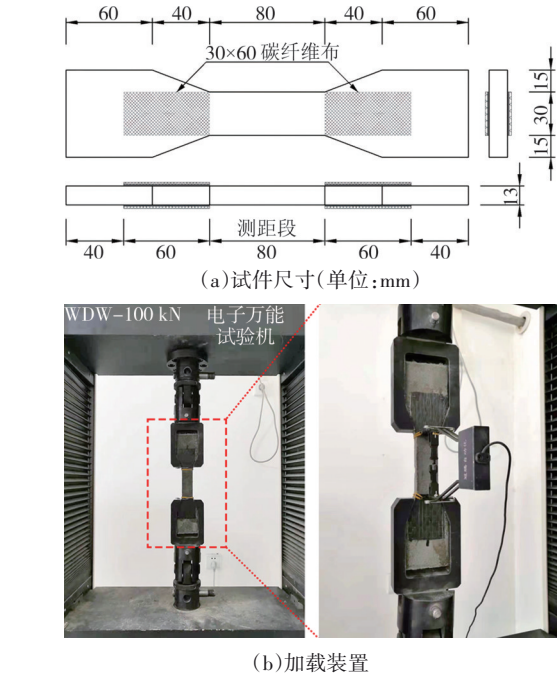


图1 轴拉试验试件尺寸及加载装置

Fig.1 Specimen size and test setup of axial tensile test

$m_{\text{普通硅酸盐水泥}}:m_{\text{粉煤灰}}:m_{\text{S95级矿物掺合料}}:m_{\text{水}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{减水剂}}:m_{\text{消泡剂}}:m_{\text{HPMC}}=4.000:1.000:1.500:0.415:1.521:3.324:0.021:0.017:0.001$.采用2种不同直径的国产PE纤维,分别为22 μm和25 μm,体积率为1.00%、1.25%和1.50%.纤维的性能参数如表2所示.

表2 PE纤维性能参数

Tab.2 Performance indicators of PE fiber

直径/ μm	长度/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/%	密度/ (g·cm ⁻³)
22,25	12	3 800	145	3	0.97

1.3 试件成型与养护

将普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、粉煤灰、石英砂等粉料混合干拌1 min,加入水和减水剂湿拌1 min,得到均匀流动的浆体,再加入纤维搅拌3 min,搅拌时间的终止以纤维不结团为依据,保证纤维的充分分散.将搅拌好的拌合物装入模具中,并用振动台振动1 min,保证试件密实.所有试件均带模具在标准养护条件下养护2 h拆模,部分试件立即擦干表面水分并烘干以测定其2 h性能,其余试件放回标准养护室中养护至相应龄期再进行加载试验.

1.4 HES-HDC材料特性

依据JC/T 2461—2018^[21],研究了纤维直径为22 μm、纤维体积率为1.00%的HES-HDC基本力学性能.抗压强度采用尺寸为100 mm×100 mm×100 mm立方体试件测得,三点抗折强度和四点抗弯强度均采用

40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件测得,等效弯曲韧性根据四点弯曲试验的荷载-挠度曲线获得^[22],抗拉强度由图1中的狗骨形薄板单轴拉伸试件测得.以上结果列于表3.

表3 高早强高延性混凝土的力学特性
Tab.3 Mechanical properties of HES-HDC

龄期	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗弯强度/ MPa	弯曲韧性/ (kJ·m ⁻³)
2 h	29.2	8.54	3.40	13.84	148.37
24 h	48.1	17.07	5.77	17.12	170.10
7 d	53.0	17.27	5.87	18.22	175.98
28 d	59.0	17.51	6.03	19.44	190.47
56 d	60.7	18.05	—	19.91	192.96

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变曲线

单轴拉伸试验得到的17组HES-HDC试件拉伸应力-应变曲线如图2所示,其中,拉伸应力(σ)为试验机记录的拉伸荷载(F)与试件测距段横截面积(A , $A=13\times 30\text{ mm}^2$)的比值;拉伸应变为引伸计记录的轴向拉伸位移(l)与测距段总长(l_0 , $l_0=80\text{ mm}$)的比值,以百分比形式表示.

由图2可见,与普通混凝土的脆性断裂模式不同,所有HES-HDC试件均显示出延性破坏,呈明显的多裂缝开展(这可由拉伸应力-应变曲线中应力向下波动的次数近似反映出来),试件最终典型的多缝开裂失效模式如图3所示.在相同纤维体积率(1.00%)下,与大直径纤维相比,小直径纤维试件拉伸强度略有降低,但各龄期的试验曲线均较为饱满,拉伸应变保持能力较强;在相同纤维直径(25 μm)下,与纤维体积率为1.00%和1.50%相比,纤维体积率为1.25%的HES-HDC试件具有更强的拉伸变形能力,各龄期试件均具有显著的应变-硬化响应,表现出明显的高延性与高韧性.

由图2还可见,各组HES-HDC试件的拉伸应力-应变曲线包括了三阶段:未开裂的弹性阶段、多缝开裂的强化阶段和承载力下降的破坏阶段(也称为应变软化阶段).各阶段特点如下:1)在弹性阶段,HES-HDC试件所受的拉伸荷载较小,其拉伸应力与应变为线性增加,此阶段没有裂缝产生.随着荷载的增加,试件出现第一条裂缝后进入强化阶段.2)在强化阶段,拉伸应力表现为随着应变的增大呈现锯齿形状的提高,这是由试件的多缝开裂以及开裂后纤维

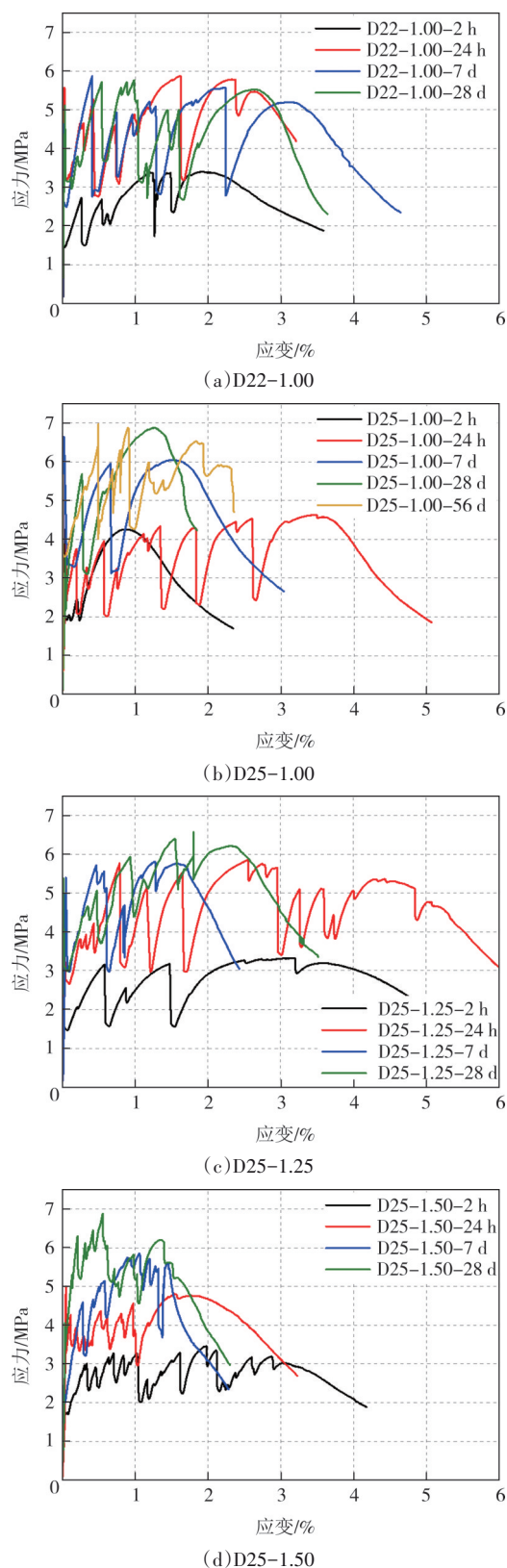


图2 各龄期HES-HDC试件拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Tensile stress-strain curve of HES-HDC specimens at different curing ages

维的桥联作用引起的.为便于计算与应用,将此阶段的拉伸应力-应变关系简化为线性关系(见图4),可

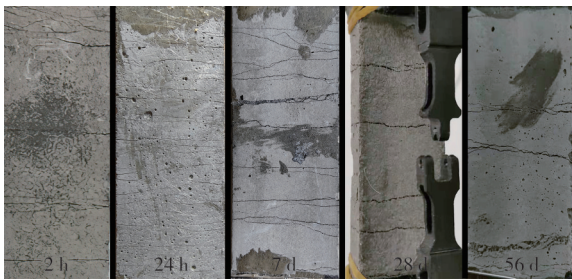


图3 典型的多缝开裂失效模式:不同龄期D25-1.00试件
Fig.3 Typical multiple cracking failure mode: D25-1.00 specimens at different curing ages

知,与弹性阶段相比,简化后曲线斜率明显降低.随着荷载的继续增加,当拉伸应力达到峰值强度时,进入破坏阶段.3)在破坏阶段,试件的拉伸应力随着应变的增加快速降低,表现出软化行为.

综上,HES-HDC简化的拉伸应力-应变曲线可采用三折线型本构方程表示,如图4及式(1)所示:

$$\sigma = \begin{cases} E_1 \varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cr}; \\ \sigma_{cr} + E_2(\varepsilon - \varepsilon_{cr}), & \varepsilon_{cr} < \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ \sigma_p - E_3(\varepsilon - \varepsilon_p), & \varepsilon > \varepsilon_p. \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 和 E_3 分别为HES-HDC在弹性阶段、强化阶段和破坏阶段的拉伸弹性模量; σ_{cr} 、 σ_p 分别为HES-HDC初裂应力和峰值拉伸应力; ε_{cr} 、 ε_p 分别为HES-HDC初裂应变和峰值拉伸应变.

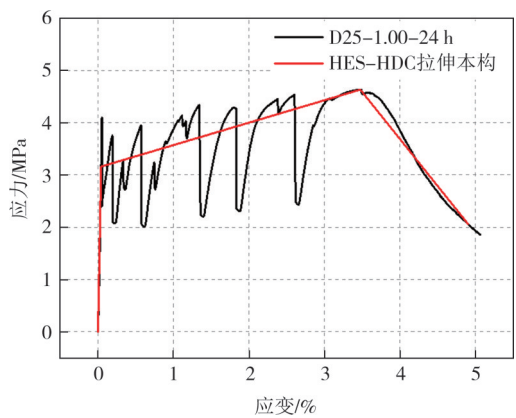


图4 HES-HDC拉伸本构的简化模型
Fig.4 Simplified tensile constitutive model of HES-HDC

2.2 拉伸破坏机理

在加载初期,HES-HDC试件处于弹性阶段,未观察到任何裂缝的出现;当荷载达到试件的极限开裂荷载时,试件在最薄弱部位出现第一条裂缝,此时试件进入强化阶段,随着轴向拉伸荷载的增加,桥接在裂缝中的PE纤维承受的拉伸应力增大,应力通过纤维/基体界面的桥联作用传递给附近的水泥基体.当PE纤维传递的应力大于周围水泥基体的开裂应

力时,试件产生新的裂缝.此时,新裂缝处应力传递也遵循相同的力学行为,因此,试件受拉呈现多裂缝开展现象^[2],如图3所示.随着轴向拉伸荷载的进一步增加,直至达到试件的极限抗拉承载力时,试件进入破坏阶段,在此阶段,水泥基体几乎丧失了承载能力,桥接在裂缝中的纤维承担了全部荷载,越来越多的纤维从水泥基体中被拔出和拔断,导致纤维/基体黏结面积逐渐减小,从而降低了抗拉强度.最后,试件的抗拉承载力进入衰减阶段,裂缝宽度增大,直至在某一条裂缝处发生失稳扩展,试件断裂.

2.3 拉伸力学性能指标

通过薄板单轴拉伸应力-应变曲线计算得到的各组HES-HDC试件基本拉伸力学性能指标的平均值如表4所示,其中,将初始弹性阶段的斜率定义为HES-HDC材料的拉伸弹性模量(E_1);将曲线上斜率首次为零^[23]的点定义为HES-HDC材料的可视开裂点,其对应的拉伸应力与应变定义为初裂强度(σ_{cr})与初裂应变(ε_{cr});将最大拉伸应力及其所对应的应变分别定义为HES-HDC材料的峰值拉伸强度(σ_p)与峰值拉伸应变(ε_p).

表4 各组试验结果
Tab.4 Test results of each group

试件名称	σ_{cr}/MPa	σ_p/MPa	$\varepsilon_{cr}/\%$	$\varepsilon_p/\%$	E_1/GPa
D22-1.00-2 h	2.38	3.40	0.020	1.939	20.1
D22-1.00-24 h	5.40	5.77	0.025	2.331	19.9
D22-1.00-7 d	5.53	5.87	0.030	3.095	19.9
D22-1.00-28 d	5.56	6.03	0.015	2.631	19.9
D25-1.00-2 h	3.44	4.26	0.007	0.876	21.8
D25-1.00-24 h	5.10	5.66	0.056	3.552	21.3
D25-1.00-7 d	5.55	6.64	0.022	1.509	21.3
D25-1.00-28 d	5.66	6.88	0.048	1.278	21.3
D25-1.00-56 d	6.12	6.97	0.004	1.318	21.3
D25-1.25-2 h	2.94	3.35	0.017	3.193	23.9
D25-1.25-24 h	4.84	5.41	0.052	4.427	23.7
D25-1.25-7 d	5.40	6.04	0.037	1.572	23.7
D25-1.25-28 d	5.57	6.57	0.026	1.821	23.3
D25-1.50-2 h	2.72	3.29	0.025	2.112	25.7
D25-1.50-24 h	4.37	4.55	0.052	2.878	25.4
D25-1.50-7 d	4.72	5.85	0.018	1.452	25.4
D25-1.50-28 d	5.24	6.02	0.038	1.445	25.4

由表4可知,各组HES-HDC试件在2 h龄期时峰值拉伸强度均达到3.29 MPa以上,最高可达4.26 MPa;其2 h峰值拉伸应变为0.88%~3.19%,约为普通混凝土拉伸应变(0.01%)的88~319倍,表明了HES-HDC材料具有高早强、高延性特性.HPMC掺入后有助于

纤维在水泥浆体中均匀分散,同时降低了基体的断裂韧性^[24],利于HES-HDC材料的多缝开裂。

由表4还可知,龄期的增长对各组HES-HDC试件的拉伸弹性模量没有明显影响,在24 h后试件的弹性模量即达到稳定状态;在28 d时,各组HES-HDC试件的弹性模量为19.9~25.4 GPa,低于普通混凝土的弹性模量(30.0 GPa),有利于降低HES-HDC材料因收缩所产生的拉应力,从而降低其早期开裂的可能性^[25-26]。

2.4 因素分析

为便于分析,根据表4试验数据绘出如图5~图7所示拉伸性能分析图,探讨试验变量(包括养护龄期、纤维直径和纤维体积率)对HES-HDC拉伸强度与拉伸应变的影响,内容分析如下:

2.4.1 养护龄期

由表4和图5可知,D22-1.00、D25-1.00、D25-1.25和D25-1.50试件初裂强度、峰值强度随龄期的增长均不断提高,且强度的增长主要发生在24 h之内,其2 h峰值强度分别达到3.40 MPa、4.26 MPa、3.35 MPa和3.29 MPa,满足快速修复使用需求^[11];24 h峰值强度分别为5.77 MPa、5.66 MPa、5.41 MPa和4.55 MPa,分别是其28 d峰值强度的95.7%、82.3%、82.3%和75.6%。试件24 h之后抗拉强度增长速率变缓;7 d之后抗拉强度增长进入稳定期;28 d时,各类型试件峰值强度分别达到6.03 MPa、6.88 MPa、6.57 MPa和6.02 MPa,为规范(GB 50010—2010)^[27]中C60混凝土轴心抗拉强度标准值(2.85 MPa)的2.11~2.41倍。

由图5仍可知,各类型试件初裂应变、峰值应变随龄期的增长均呈先提高后降低的趋势,总体在24 h时达到最大值,其峰值应变分别为3.10%、3.55%、4.43%和2.88%。随后随龄期的增长拉伸应变降低,但降低幅度逐渐减小,并在28 d时趋于稳定,D22-1.00、D25-1.00、D25-1.25和D25-1.50试件在28 d时峰值拉伸应变依然可以分别保持在2.63%、1.28%、1.82%和1.45%以上。HES-HDC具有较高的拉伸应变能力,将其作为加固修补材料,能与既有结构有着足够好的变形协同性,可避免新旧材料界面的破坏。

龄期的增长对HES-HDC拉伸强度与应变的影响,究其原因,SAC水泥的快速水化使得HES-HDC材料在24 h内强度和延性快速提高,且随着龄期的不断增长,HES-HDC材料内未水化的水泥颗粒依然在继续水化,使得基体更加密实,断裂韧性 K_m 增大;

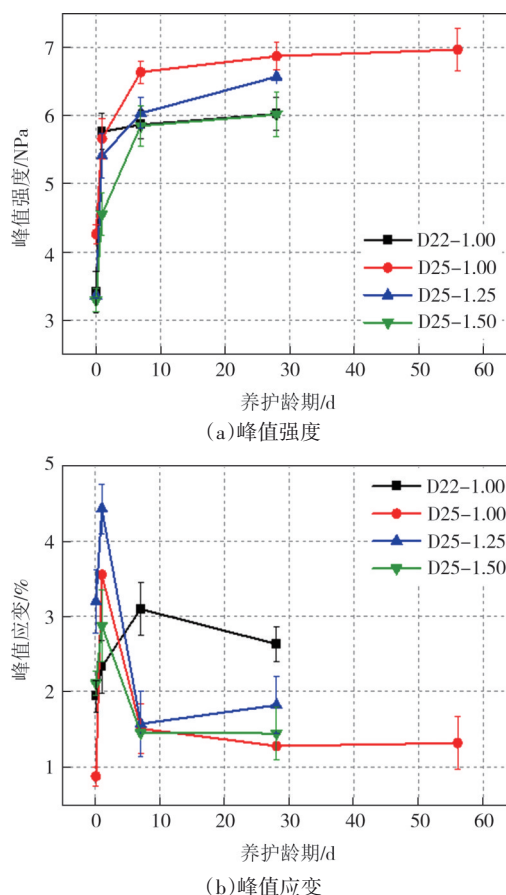


图5 养护龄期对HES-HDC试件拉伸性能影响

Fig.5 Effect of curing age on tensile properties of HES-HDC specimens

同时更多的水化产物使得纤维/基体界面间的摩擦力 τ_0 增大,从而提高了纤维桥联应力水平,因此强度得到进一步提高。24 h之后拉伸应变降低,这是因为:一方面,增大的基体断裂韧性 K_m 使得裂纹尖端断裂韧性 J_{ip} 增大;另一方面,纤维/基体界面特性变化导致纤维桥接处最大剩余能 J_b' 降低^[9],从而降低了伪应变强化指数值(PSH, $PSH=J_b'/J_{ip}$),对HES-HDC的延性与韧性不利。但细观力学模型分析表明^[9,12],基体断裂韧性 K_m 、纤维/基体界面间摩擦力 τ_0 和纤维滑移硬化系数 β 均随龄期的增长而增长并趋于稳定,故PSH存在理论界限值,即多裂缝开展的裕度后期将保持不变,因此拉伸应变存在下限值。综合分析,28 d时的拉伸应变为HES-HDC应变能力的下限值,故可将该龄期时的拉伸应变值作为工程应用参考值。

2.4.2 纤维直径

由图6可知,当HES-HDC纤维体积率相同(1.00%)时,大直径纤维试件的拉伸强度总体高于小

直径纤维试件,而小直径纤维试件的拉伸应变总体高于大直径纤维试件.然而,在24 h龄期时,试件的拉伸强度与应变呈相反趋势,D25-1.00类型试件的峰值强度低于D22-1.00类型试件(降低了1.9%),而D25-1.00类型试件峰值应变则高于D22-1.00类型试件(提高了52.4%).这可能是因为,在24 h时,HES-HDC材料内纤维/基体的界面黏结特性与其他龄期存在明显差异^[9,26],导致大直径纤维更容易从基体中拔出,因此试件拉伸应变较大,而抗拉强度较低.在2 h、7 d和28 d时,D25-1.00类型试件峰值强度比D22-1.00类型试件分别提高了25.3%、13.1%和14.1%;D22-1.00类型试件峰值应变比D25-1.00类型试件分别提高了121.3%、105.1%和105.9%.

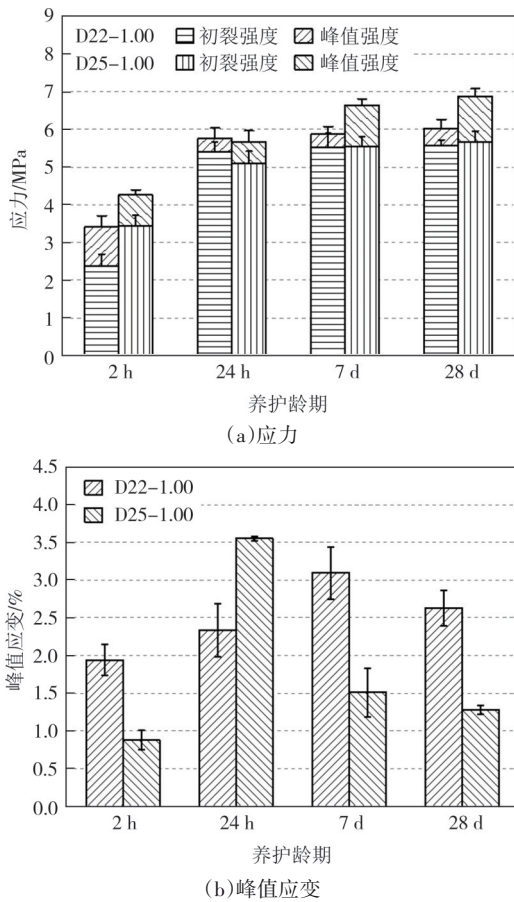


图6 纤维直径对HES-HDC试件拉伸性能的影响

Fig.6 Effect of fiber diameter on tensile properties of HES-HDC specimens

纤维直径对HES-HDC拉伸性能的影响是通过影响纤维的桥联作用来实现的.当纤维长度及纤维体积率相同时,纤维直径越小,纤维的比表面积越大,其与基体的黏结强度越高,纤维桥联作用越显著,有利于提高试件的抗拉强度与拉伸应变.但从试

验结果分析可知,当纤维体积率为1.00%时,直径较小的PE纤维容易降低拌合物的和易性,使得基体产生更多的自然缺陷,基体韧性降低,对试件的抗拉强度不利,但有利于拉伸应变^[2,9].

2.4.3 纤维体积率

图7给出了HES-HDC试件在不同纤维体积率下的抗拉强度与拉伸应变.由图7可知,当纤维直径相同时,试件的拉伸强度随纤维体积率的增加而降低,纤维体积率从1.00%增加至1.50%,试件2 h、24 h、7 d和28 d峰值强度分别降低了22.8%、19.6%、11.9%和12.5%.而试件的拉伸应变对纤维体积率具有敏感性.随纤维体积率的增加,试件拉伸应变呈先提高后降低的趋势,在纤维体积率为1.25%时达到最大值,其2 h、24 h、7 d和28 d峰值应变分别为3.19%、4.43%、1.57%和1.82%.由此可见:1) HES-HDC材料适用的纤维体积率在1.00%~1.25%,低于传统HDC材料纤维体积率(2.0%~2.5%)^[19,28]. 2) 综合试件的拉伸强度与应变,最佳纤维体积率为1.25%.

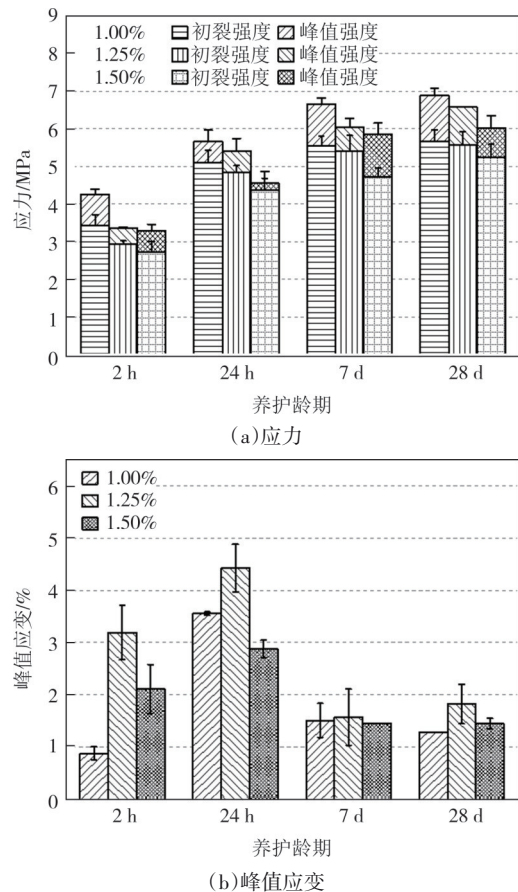


图7 纤维体积率对HES-HDC试件拉伸性能的影响

Fig.7 Effect of fiber volume fraction on tensile properties of HES-HDC specimens

纤维体积率对HES-HDC材料拉伸性能的影响主要有以下3个因素:1)SAC水泥的早强快凝特性导致了拌合物凝结较快,因此需要控制纤维的用量及拌合物的搅拌时间;2)随纤维体积率的增加,拌合物的流动性逐渐降低,纤维的分散受到阻碍,削弱了纤维的桥联作用;3)当纤维体积率超过一定值时,由于PE纤维的疏水性且呈棉絮状,在搅拌过程中会发生部分黏合,PE纤维不能完全被基体包裹,对基体没有增强作用,反而降低了试件的抗拉强度与拉伸应变。

根据本文试验结果分析可知,当纤维体积率未超过界限值(导致强度与延性均下降的纤维体积率)时,随着纤维体积率的增加,纤维数量在一定程度增加会使得基体内部产生微小缺陷,降低了基体韧性,使得试件强度降低,但延性得到了提高。当纤维体积率超过界限值时,PE纤维容易聚集成团,形成宏观缺陷,导致了试件的强度与延性均降低。由于大直径纤维试件需要更高的体积率才能达到小直径纤维试件的拉伸性能^[29],因此在相同纤维体积率(1.00%)下,小直径纤维拉伸试件的拉伸应变高于大直径纤维试件,而当大纤维直径试件的体积率增加至1.25%时,其拉伸应变增大,达到甚至高于小直径纤维试件的拉伸应变。

3 HDC拉伸韧性评价方法及影响因素

材料韧性指标是用来定量描述材料强度与变形能力的综合性指标,综合表征材料的耗能能力和耐损伤能力。日本标准(JSCE-SF4)^[30]、美国标准(ASTM C1609/C1609M-12)^[23]和中国标准(CECS 13:2009)^[31]均提出了纤维混凝土弯曲韧性试验标准及评价方法,并从能量和强度的角度给出了材料韧性评价指标。然而,目前纤维混凝土韧性的考察主要通过四点弯曲试验,鲜有对单轴拉伸试验提出合适的韧性评价方法。由于HDC区别于传统纤维混凝土的是其显著的拉伸应变强化特性,而四点弯曲试验得到的试验曲线难以真实反映材料拉伸强化特点^[18-19],因此,针对力学性能更优的HDC,应根据其拉伸变形特点来选用合适的韧性评价方法。

PE纤维对HDC拉伸性能的改善与HDC所处的受力阶段有关。PE纤维对HDC峰值荷载前的改善主要表现在提高峰值拉伸强度、峰值应变和韧性;对峰值荷载后的改善主要表现在提高残余拉伸强度与持荷能力。针对现有纤维混凝土韧性评价方法适用性

的不足,本文提出了HDC拉伸韧性评价新方法。

建议的新方法分别从能量比和强度比两个角度对HDC薄板各受力阶段的拉伸韧性进行评价,能量比形式的拉伸韧性指数 I 和强度比形式的拉伸强度系数 R 分别见式(2)、式(3)。

$$I = \begin{cases} I_p = \frac{T_p}{T_{cr}}, \varepsilon_{cr} < \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ I_{p,k} = \frac{T_{p,k}}{T_p}, \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_k. \end{cases} \quad (2)$$

$$R = \begin{cases} R_p = \frac{\sigma_{e,p}}{\sigma_{cr}}, \varepsilon_{cr} < \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ R_{p,k} = \frac{\sigma_{e,p,k}}{\sigma_p}, \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_k. \end{cases} \quad (3)$$

拉伸韧性指数 I 由强化指数 I_p 和残余指数 $I_{p,k}$ 组成,用于评价HDC从初裂到应变强化段至峰值点、应变软化段至承载力不显著降低点时全过程的拉伸韧性。式(2)中, ε_{cr} 为依据ASTM C1609/C1609M-12标准确定的初裂应变,见图8; ε_p 为峰值应变; ε_k 为加载全过程阶段的拉伸应变,其值为应力下降至峰值应力 k 倍(k 可取0.85、0.50、0.20)时对应的拉伸应变,具体可根据工程计算需求确定; T_{cr} 、 T_p 和 T_k 分别表示从原点 O 至 ε_{cr} 、 ε_p 和 ε_k 范围内拉伸应力-应变曲线下的面积; $T_{p,k}$ 表示从 ε_p 至 ε_k 范围内拉伸应力-应变曲线下的面积,表达式见式(4):

$$T_{p,k} = T_k - T_p. \quad (4)$$

拉伸强度系数 R 由强化强度系数 R_p 和残余强度系数 $R_{p,k}$ 组成,分别以等效强化强度和等效残余强度来评价HDC薄板加载全过程的拉伸韧性。式(3)中, $\sigma_{e,p}$ 和 $\sigma_{e,p,k}$ 分别为等效强化强度和等效残余强度,表达式见式(5)、式(6); σ_{cr} 、 σ_p 分别为初裂强度(依据ASTM C1609/C1609M-12标准确定的可视初裂点,见图8)和峰值强度。

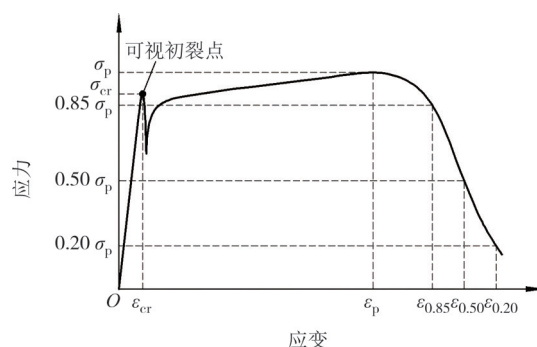


图8 HDC拉伸韧性评价新方法

Fig.8 New method for HDC tensile toughness evaluation

$$\sigma_{e,p} = \frac{T_p}{\varepsilon_p} \tag{5}$$

$$\sigma_{e,p,k} = \frac{T_k - T_p}{\varepsilon_k - \varepsilon_p} \tag{6}$$

上述建议的 HDC 拉伸韧性评价新方法具有以下优点:1)可全面评价 HDC 峰值应力前应变强化段及峰值应力后应变软化段全过程的拉伸韧性;2) ε_k 的取值借鉴了延性的定义^[32],即 HDC 拉伸屈服至达到峰值应力或达到以后而应力未显著下降期间(通常为峰值应力的 85%)的变形能力,能有效反映 HDC 在高应力水平下的拉伸韧性;3) $I_{p,k}$ 、 $R_{p,k}$ 可设定不同应力水平下的应变值 ε_k ,其结果所反映的 HDC 拉伸韧性更能满足工程计算需要;4)采用无量纲的形式,不受不同试件尺寸及拉伸测试方法的限制.从物理意义上讲, I_p 、 $I_{p,0.85}$ 值越大,表明强化韧性水平、残余韧性水平越高,PE 纤维对各受力阶段的拉伸韧性贡献越大; R_p 、 $R_{p,0.85}$ 值越大,表明等效强化强度、等效残余强度越高,PE 纤维对持荷能力的增强贡献越大.

基于本文试验结果,利用式(2)~式(6)计算出 17 组 HES-HDC 薄板单轴拉伸试件的拉伸韧性指数 I 和拉伸强度系数 R (见表 5).其中, k 取 0.85.新方法评价 17 组 HES-HDC 试件的拉伸韧性内容如下.

1) 养护龄期的影响.

由表 5 可知,各组 HES-HDC 试件的强化指数 I_p

表 5 各组 HDC 试件的拉伸韧性指数 I 与拉伸强度系数 R
Tab.5 The tensile toughness index I and tensile strength coefficient R of HDC specimens in each group

试件编号	$\sigma_{e,p}/$ MPa	I_p	R_p	$\sigma_{e,p,0.85}/$ MPa	$I_{p,0.85}$	$R_{p,0.85}$
D22-1.00-2 h	2.65	235.10	1.143	3.18	0.47	0.945
D22-1.00-24 h	4.41	251.90	0.889	5.16	0.42	0.931
D22-1.00-7 d	4.47	232.92	0.918	4.94	0.35	0.950
D22-1.00-28 d	4.45	225.19	1.276	5.27	0.19	0.953
D25-1.00-2 h	2.98	155.59	0.885	4.04	0.61	0.941
D25-1.00-24 h	3.64	174.03	0.888	4.39	0.21	0.936
D25-1.00-7 d	4.94	144.46	0.837	5.60	0.33	0.948
D25-1.00-28 d	5.04	155.81	1.172	6.13	0.31	0.942
D25-1.00-56 d	5.10	159.90	1.317	5.95	0.44	0.948
D25-1.25-2 h	2.64	290.38	0.902	3.03	0.43	0.926
D25-1.25-24 h	4.36	330.63	0.894	4.82	0.20	0.921
D25-1.25-7 d	4.73	272.19	0.876	5.44	0.25	0.944
D25-1.25-28 d	5.04	256.21	1.346	6.04	0.34	0.946
D25-1.50-2 h	1.99	236.96	0.806	3.71	0.81	0.904
D25-1.50-24 h	3.63	281.70	0.854	4.19	0.92	0.926
D25-1.50-7 d	4.66	241.99	0.835	5.19	0.58	0.928
D25-1.50-28 d	4.86	177.24	1.011	5.77	0.64	0.930

随龄期的增长呈先提高后降低的趋势,均在 24 h 龄期时取得最大值,这与 2.4.1 节描述试件拉伸应变随龄期增长的变化规律相似,表明强化段的韧性水平与拉伸应变密切相关.试件拉伸变形越大,其拉伸破坏过程中所吸收的能量越多,韧性越高.而试件的残余指数 $I_{p,0.85}$ 随龄期的增长呈降低的趋势,随龄期从 2 h 增长至 28 d,各类型 D22-1.00、D25-1.00、D25-1.25 和 D25-1.50 试件的残余指数 $I_{p,0.85}$ 分别降低了 59.6%、49.2%、20.9% 和 21.0%.在水化初期,基体强度和基体/纤维的黏结强度较低,在拉伸过程中纤维容易从基体中拔出.随着水化反应的进行,基体强度和黏结强度不断增大,使得破坏模式由纤维拔出向拔断转变^[9],导致拉伸应变能力下降,从而降低了拉伸韧性指数 $I(I_p$ 和 $I_{p,0.85})$.

由表 5 还可知,试件的强化强度系数 R_p 和残余强度系数 $R_{p,0.85}$ 均随龄期的增长有增大趋势.然而, R_p 、 $R_{p,0.85}$ 在 24 h 和 7 d 龄期时略有降低,这是由于 HES-HDC 材料在 7 d 内水化反应速率较快,试件强度的增长明显快于变形能力的提高,从而导致 R_p 和 $R_{p,0.85}$ 在 24 h 和 7 d 时略有降低.但从 2 h 增长至 28 d, D22-1.00、D25-1.00、D25-1.25 和 D25-1.50 试件的 R_p 分别提高了 11.6%、32.4%、49.2% 和 25.4%, $R_{p,0.85}$ 分别提高了 0.8%、0.1%、2.2% 和 2.9%.试件的 R_p 和 $R_{p,0.85}$ 增大,说明试件的持荷能力增强.

2) 纤维直径的影响.

由表 5 可知,当纤维体积率相同时,各龄期 HES-HDC 试件的强化指数 I_p 在小直径纤维(22 μm)下取得较大值,D22-1.00 类型试件在 2 h、24 h、7 d 和 28 d 时的强化指数 I_p 比 D25-1.00 类型试件分别提高了 33.8%、30.9%、38.0% 和 30.8%.这是由于小直径纤维比大直径纤维根数多,纤维桥联作用更显著,试件拉伸开裂后基体受到纤维的约束作用更大,破坏过程所吸收的能量更多,因此,D22-1.00 类型试件的强化指数 I_p 高于 D25-1.00 类型试件.但受龄期的影响,峰值前应变能 T_p 和峰值后应变能 $T_{p,0.85}$ 同时增大,导致了不同直径纤维试件的残余指数 $I_{p,0.85}$ 变化不明显.

由表 5 还可知,小直径纤维试件的强化强度系数 R_p 、残余强度系数 $R_{p,0.85}$ 高于大直径纤维试件.这是因为小直径纤维的根数较多,纤维提供的桥接力越大,试件拉伸强度系数 $R(R_p$ 和 $R_{p,0.85})$ 越高.

3) 纤维体积率的影响.

由表 5 可知,HES-HDC 试件的强化指数 I_p 对纤维体积率具有敏感性,当纤维直径相同时,试件的强

化指数 I_p 随纤维体积率的增加呈先提高后降低的趋势,在纤维体积率为1.25%取得最大值,其2 h、24 h、7 d和28 d的 I_p 值较纤维体积率为1.00%时分别提高了46.4%、47.4%、46.9和39.2,较纤维体积率为1.50%时分别提高了18.4%、14.8%、11.1%和30.8%。而试件的残余指数 $I_{p,0.85}$ 随纤维体积率的增加呈先降低后提高的趋势,在纤维体积率为1.25%时取得最小值,这并不能说明纤维体积率为1.25%时残余拉伸韧性最低,这是因为D25-1.25类型试件的峰前应变能 T_p 明显高于D25-1.00、D25-1.50类型试件(从图2可以看出D25-1.25类型试件拉伸应力-应变曲线更为饱满,相较于D25-1.00、D25-1.50类型试件峰值应力前包围的面积更大)。

由表5还可知,试件的强化强度系数 R_p 、残余强度系数 $R_{p,0.85}$ 对纤维体积率具有敏感性,当纤维直径相同时,试件的强化强度系数 R_p 、残余强度系数 $R_{p,0.85}$ 随纤维体积率的增加总体表现出先提高后降低的趋势,在纤维体积率为1.25%时取得最大值。究其原因,当纤维体积率未超过最优体积率时,纤维所形成的三维网格结构能够有效约束基体,提高了HES-HDC强度与变形能力;随着纤维体积率的增加,三维网格结构逐步得到填充,对HES-HDC的增强效果更明显。当体积率超过最优体积率时,PE纤维的根数越多,越容易在浇筑过程中聚集成团,形成宏观缺陷,从而降低试件的拉伸韧性。

4 结论

本文通过单轴拉伸试验研究不同PE纤维直径与体积率对各龄期HES-HDC薄板拉伸力学性能的影响;对17组HES-HDC薄板试件的拉伸韧性进行了评价,得出以下结论:

1)单轴拉伸试验充分展示了HES-HDC应变强化特性,其破坏过程呈多裂缝开展;拉伸变形全过程分为3个阶段:线弹性阶段、应变强化阶段和应变软化阶段。

2)2 h龄期时,各组HES-HDC拉伸强度与应变达到3.29 MPa和0.88%以上,满足结构快速修复需求。24 h之后,HES-HDC拉伸应变逐渐降低并在28 d时趋于稳定。在28 d时,各组HES-HDC试件拉伸应变依然保持在1.28%~2.63%,约为普通混凝土的128~263倍。

3)PE纤维直径与体积率对HES-HDC拉伸性能有明显影响。在纤维体积率为1.00%时,小直径纤维

对试件拉伸应变有利,而大直径纤维对试件拉伸强度有利;综合大直径纤维试件拉伸强度与应变,纤维最佳体积率为1.25%。

4)基于单轴拉伸试验,提出了一种采用能量比形式的拉伸韧性指数 I 和强度比形式的拉伸强度系数 R 来评价HDC的拉伸韧性。随着龄期的增长,HES-HDC拉伸韧性指数 I 降低,而拉伸强度系数 R 提高;小直径纤维试件拉伸韧性高于大直径纤维试件;纤维体积率为1.25%时试件拉伸韧性最大。

本文研究成果可为HES-HDC的结构设计和非线性模拟分析提供试验依据。

参考文献

- [1] 刘加平,汤金辉,韩方玉.现代混凝土增韧防裂原理及应用[J].土木工程学报,2021,54(10):47-54.
LIU J P, TANG J H, HAN F Y. Toughening and crack prevention of modern concrete: mechanisms and applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10): 47-54. (in Chinese)
- [2] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [3] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [4] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [5] LI V C. High performance fiber reinforced cementitious composites as durable material for concrete structure repair/faser verstärkte, zement gebundene, zusammen gesetzte hochleistungswerkstoffe für das dauerhafte instandsetzen von betontragwerken [J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2004, 10(2): 163-180.
- [6] LI T, DENG M K, JIN M N, et al. Experimental study on axial compressive behavior of full-scale masonry columns strengthened with reinforced high ductile concrete (RHDC) [J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113650.
- [7] LEPECH M D, LI V C. Application of ECC for bridge deck link slabs [J]. Materials and Structures, 2009, 42(9): 1185-1195.
- [8] LI V C, FISCHER G, LEPECH M. Crack resistant concrete material for transportation construction [C]//Proceedings of Cd TRB Meeting 2004. Washington, DC: Transportation Research Board, 2004.
- [9] WANG S, LI V C. High-early-strength engineered cementitious composites [J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(2): 97-105.
- [10] LI M, LI V C. High-early-strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair-material properties [J]. ACI Materials Journal, 2011, 108(1): 3-12.

- [11] 范洪侃. 高早强高延性水泥基复合材料制备与力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
FAN H K. Preparation and mechanical properties of high early strength and high ductility cement matrix composites [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- [12] 邓涵文. 水泥基复合材料多功能特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
DENG H W. Research on multifunctional properties of engineered cementitious composites [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [13] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 217–227.
- [14] RANADE R, LI V C STULTS M D, et al. Composite properties of high-strength, high-ductility concrete [J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(4): 413–422.
- [15] RANADE R, LI V C STULTS M D, et al. Micromechanics of high-strength, high-ductility concrete[J]. ACI Materials Journal, 2013, 110(4): 375–384.
- [16] ZHANG D, YU J, WU H L, et al. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 184: 107741.
- [17] KAMAL A, KUNIEDA M, UEDA N, et al. Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 863–871.
- [18] NAAMAN A E, REINHARDT H W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response[J]. Materials and Structures, 2006, 39(5): 547–555.
- [19] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 32–41.
XU S L, LI H D. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 32–41. (in Chinese)
- [20] YOKOTA H, ROKUGO K, SAKATA N. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks[C]//High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. Tokyo: Springer, 2008: 2.
- [21] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2018. (in Chinese)
- [22] 高延性混凝土应用技术规程: DBJ/T 12—2016[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2016.
Technical specification for application of high ductile concrete: DBJ/T 12—2016 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2016. (in Chinese)
- [23] Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading): ASTM C1609/C1609M—12[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [24] 张帅. 增稠剂在PVA超高韧性水泥基复合材料中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
ZHANG S. The application of viscosity-modifying admixture to PVA ultra ductile fiber reinforced cementitious composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [25] LI V C. High performance fiber reinforced cementitious composites as durable material for concrete structure repair[J]. International Journal for Restoration, 2004, 10(2): 163–180.
- [26] 张志刚, 尹志伟, 秦凤江. 低模量早强型高延性混凝土的力学行为[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 707–713.
ZHANG Z G, YIN Z W, QIN F J. Mechanical performance of engineered cementitious composites (ECC) with low modulus and early strength [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5): 707–713. (in Chinese)
- [27] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [28] LI V C. Advances in ECC research[J]. ACI Special Publications, 2002, 206: 373–400.
- [29] BERTELSEN I M G, OTTOSEN L M, FISCHER G. Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: a review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116769.
- [30] Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete: JSCE-SF4 [S]. Tokyo: Japan Concrete Institute, 1984.
- [31] 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13: 2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)
- [32] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 3版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
GUO Z H. Principle of reinforced concrete [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)