

延性纤维增强混凝土单轴拉伸性能试验研究*

寇佳亮^{1,2}, 邓明科¹, 梁兴文¹

(1 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 2 西安理工大学土木建筑工程学院, 西安 710048)

[摘要] 选用 5 种不同的 PVA 纤维配制延性纤维增强混凝土, 对其进行单轴拉伸性能试验, 测得材料的立方体抗压强度、密度和拉伸应力-应变全曲线。通过试验对比分析发现, 掺加不同 PVA 纤维的延性纤维增强混凝土的拉伸应力-应变曲线均具有一定的应变硬化特性; 不同 PVA 纤维性能对初裂应力-应变、峰值应力-应变、极限拉应变和抗压强度都有明显的影响; 同一种纤维配制的延性纤维增强混凝土随着水胶比增大, 其立方体抗压强度均有明显降低, 并且密度降低; 水胶比对延性纤维增强混凝土的立方体抗压强度、应力-应变影响较大, 在满足抗拉强度和韧性的前提下应采用较低的水胶比, 这也有助于提高纤维的分散性, 但同时较低的水胶比将使其和易性变差。

[关键词] 延性纤维增强混凝土; 聚乙烯醇纤维; 单轴拉伸性能; 应力-应变曲线; 应变硬化

中图分类号: TU528.58

文献标识码: A

文章编号: 1002-848X(2013)01-0059-06

Experimental study of uniaxial tensile properties of ductile fiber reinforced concrete

Kou Jialiang^{1,2}, Deng Mingke¹, Liang Xingwen¹

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

2 School of Civil Engineering & Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The uniaxial tensile properties of ductile fiber reinforced concrete compounded with 5 various PVA fibers were tested. The cube compressive strength, density and the uniaxial tensile complete stress-strain curve were obtained. Tests of uniaxial tensile properties show that the curves of partial ductile fiber reinforced concrete have strain-hardening properties. Various PVA fibers properties have significant influence on initial cracking stress-strain, peak stress-strain, ultimate tensile strain and cube compressive strength. When the water-cement ratio of ductile fiber reinforced concrete with the same fiber increases, the cube compressive strength and density decrease. The water-cement ratio of ductile fiber reinforced concrete also has great effect on the stress-strain and cube compressive strength. The lower water-cement ratio, if the good tensile strength and toughness can be met, can help to improve the dispersion of fibers, and make it worse workability.

Keywords: ductile fiber reinforced concrete; PVA fiber; uniaxial tensile property; stress-strain curve; strain-hardening

0 引言

普通混凝土的抗拉强度约为其抗压强度的 1/10, 结构构件在不大的拉力下就可能开裂, 裂缝会引起钢筋锈蚀, 降低结构的耐久性和使用寿命^[1,2], 我国的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[3]规定了裂缝控制等级和最大裂缝宽度限值。为减少混凝土收缩裂缝, 提高抗拉强度和韧性, 高性能纤维混凝土成为改善混凝土性能和提高结构耐久性的有效方法之一。掺加纤维可以在一定程度上增强混凝土材料的抗拉强度、弯曲强度、抗剪强度等抗裂性能指标, 纤维在基体中可降低早期收缩裂缝、温度裂缝和长期收缩裂缝。但纤维混凝土试件在直接拉伸和压弯作用下, 没有表现出很好的应变硬化现象, 达到屈服极限后, 下降段较陡。

ECC(Engineered Cementitious Composite) 是设计的水泥基复合材料的简称, 最早由美国密歇根大学的 Victor C. Li 教授在 20 世纪 90 年代初提出^[4], 它是从微观力学和断裂力学原理为指导, 以水泥浆或砂浆为基体, 以纤维为增强材料, 经系统优

化设计, 掺加定量的纤维(体积掺量 ≤ 2%), 搅拌加工成型, 各种荷载作用下呈现出高延展性, 并表现出显著的假应变硬化性能(挠曲硬化特性)和多裂缝开展特性^[5-7]。目前, ECC 的应变硬化性能和多裂缝开展特性主要通过拉伸试验和弯曲试验进行评定, 拉伸试验可以同时给出拉伸弹性模量、开裂荷载、初始裂缝宽度、开裂应变、极限荷载、极限应变以及最大裂缝宽度等, 并能同时看到多裂缝的开展过程, 因此可以认为拉伸试验为 ECC 各项性能参数最直接有效的试验方法。Victor C. Li 教授通过理论指导, 利用试验加以验证, 得到极限拉伸应变达到 3% 以上具有良好的力学性能和耐久性能, 能够满足工程需要的 ECC 材料^[4-9]。徐世焯^[10]通过超高韧性水泥基复合材料拉伸试验得出纤维掺量增加到

* 国家自然科学基金资助项目(50908187, 51078305), 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E01001, E01003), 陕西省自然科学基金资助项目(2009JQ7013), 西安建筑科技大学基础研究基金资助项目(JC0902), 长江学者和创新团队发展计划资助项目, 西安理工大学博士启动资金(118-211206)。
作者简介: 寇佳亮, 博士, 讲师, Email: jialiangkou0918@163.com。

1%时,就可以获得硬化的应力-应变曲线,极限拉应变能稳定地达到3%以上。张君^[11]通过高韧性纤维增强水泥基复合材料6个配合比的单轴拉伸试验得出完整的应力-应变全曲线,并实现了应变硬化和多重开裂。赵铁军^[12]通过不同拉力作用下SHCC的毛细吸水和氯离子渗透试验研究了SHCC的抗渗性能,并探讨了硅烷乳液防水剂对SHCC在不同拉力下的抗渗性能。孙伟^[13]通过制备高延性水泥基复合材料(HDCC),从配合比设计入手,研究了粉煤灰含量、胶砂比等对HDCC力学性能的影响,优化了特定材料下的材料制备技术。

以往研究表明,选用棱柱体和薄板对于端部处理较为复杂,并且试件破坏时开裂部位可能会在测试区外出现,而对于哑铃形试件,中间是其薄弱部位,承受荷载过程中,最易在中间测试区发生开裂直至破坏,考虑到试验的可行性及准确性,本课题组采用哑铃形试件。同时,国内外企业都可以生产工程用聚乙烯醇(polyvinyl alcohol,以下简称PVA)纤维,为了对比掺加不同PVA纤维混凝土的性能,采用5种不同PVA纤维配制延性纤维增强混凝土,研究掺加不同纤维时,延性纤维增强混凝土单轴拉伸试验的力学性能,得出了单轴拉伸应力-应变全曲线,为延性纤维增强混凝土的结构设计和非线性模拟分析提供试验依据。

1 试验材料、目的与方法

1.1 试验材料

由于ECC是先经过设计再经过试验验证的一种高延性精细混凝土,所以其骨料较细,本文选取的细骨料为最大粒径1.18mm的灞河精细河砂。选用铜川某公司生产的P.O 42.5R普通硅酸盐水泥,大唐某发电厂一级粉煤灰,减水剂为萘系高效减水剂。采用的纤维以及各项性能指标如表1所示,从表中可以看到,日本KURARAY K-II纤维的直径、抗拉强度、弹性模量较其他几种纤维有明显提高。

1.2 试验目的

本试验的目的是通过采用不同纤维、不同配合比配制出具有较高延性并且性能稳定的延性纤维增强混凝土。

1.3 试件制作和养护

PVA纤维必须具有良好的分散性,所有材料的搅拌都在JJ-5砂浆搅拌机中完成。先将定量的胶凝材料(包括水泥和粉煤灰)和细砂混合干拌2min,然后将减水剂溶入水中后加入到拌合物中搅拌1~2min,最后人工加入PVA纤维,搅拌2~3min。搅拌完成之后浇筑试件,使用钢质模具成型,单层浇筑,

试件在振动台上振捣大约30s左右,试件成型36h后拆模。之后放在水箱内常温养护28d,对于试件不平的部位,需提前把浇筑面磨平,试验前3d把试件从水箱里面拿出来晾干。直接拉伸试验试件为哑铃形试件,具体试件尺寸如图1所示。

PVA纤维各项性能指标

表1

纤维编号	1	2	3	4	5
生产厂家	安徽某公司	北京某公司	山东某公司	重庆某公司	日本KURARAY K-II
长度/mm	5	12	6	12	12
直径/ μm	15	26	15	15~25	39
长径比/ $\times 10^3$	0.33	0.46	0.4	0.48~0.8	0.31
抗拉强度/MPa	≥ 1400	1560	≥ 1200	1200~1500	1600
弹性模量/GPa	≥ 35	36.3	≥ 35	32~40	40
伸长率/%	5.98	7.8	6~11	7~15	7
密度/ g/cm^3		1.3			1.3

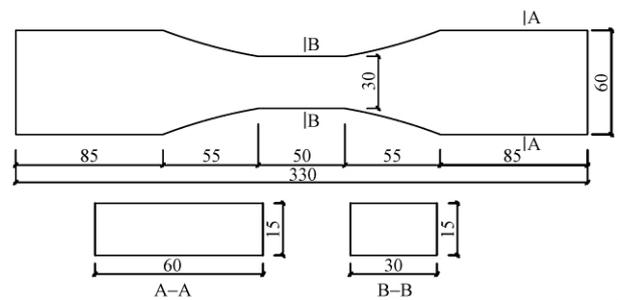


图1 试件尺寸图

延性纤维增强混凝土的各项性能受各掺料的影响很大,影响其强度的主要因素有:纤维的性能及其掺量、水胶比、砂胶比和胶凝材料的比率等。不同厂家生产的纤维的各项性能差别很大(表1)。为了比较国内外同类纤维的性能,选用了5种纤维作为此次试验的纤维。水胶比决定了混凝土的强度及和易性,同时也决定了纤维的分散性是否良好,低的水胶比能使延性纤维增强混凝土中纤维的分散性更好。为满足试验要求和具有足够的韧性,选用了两组试验水胶比,分别是0.26和0.29。参考国内外研究成果,结合本课题组前期所做的大量材料性质试验^[14],本次试验选用的砂胶比为0.36。

在混凝土中掺入一定数量优质粉煤灰,不仅能代替部分水泥,而且由于粉煤灰颗粒呈球状具有滚珠效应,起到润滑作用,可改善混凝土拌合物的粘聚性、保水性和流动性,从而改善混凝土的和易性,对于实现混凝土的泵送有很大的好处。尤其是掺加原状或磨细粉煤灰后,可以降低混凝土中水泥水化热,减少绝热条件下的温度升高。同时在混凝土中掺加一定量的具有减水、增塑、缓凝等作用的外加剂,可改善混凝土拌合物的流动性、保水性,降低水化热,推迟热峰的出现时间。基于以上各种因素,延性纤

纤维增强混凝土的试验配合比如表 2 所示,其中纤维掺量为 2%,水泥和粉煤灰掺量各占胶凝材料的 50%。

延性纤维增强混凝土试验配合比 表 2

纤维编号	试件编号	水胶比	密度 /g/mm ³	28d 平均抗压强度 /MPa
0	0-26	0.26	2.024	65.74
	0-29	0.29	1.978	57.09
1	1-26	0.26	2.055	61.42
	1-29	0.29	2.015	54.34
2	2-26	0.26	2.050	64.26
	2-29	0.29	1.973	47.96
3	3-26	0.26	2.066	64.23
	3-29	0.29	2.009	49.80
4	4-26	0.26	2.120	65.53
	4-29	0.29	2.055	63.56
5	5-26	0.26	2.065	65.68
	5-29	0.29	1.989	61.02

注:纤维编号为 0 的组为不参加纤维。

1.4 试验过程

本文所用混凝土直接拉伸试验设备为外夹式。试验在长春试验机研究所研制的电液伺服万能试验机(CSS-WAW300DL)上进行,最大荷载为 300kN,引伸计的测量标距为 50mm。试验无需其他装置,直接将试件加持在试验机上,安装时注意试件轴线与试验机轴线的对中,整个试验过程均保持加载速率为 0.5mm/min 不变,直接拉伸试验如图 2 所示。



图 2 试件拉伸试验图

2 试验结果

对 5 组共 120 个哑铃形试件进行了直接拉伸试验,部分试验测试结果如表 3 所示(由于部分试件破坏区位于测试区外,未测到数据,故未列出)。延性纤维增强混凝土直接拉伸试验应力-应变曲线如图 3 所示,其在拉伸荷载作用下的典型开裂破坏图见图 4。

3 试验结果分析

3.1 立方体抗压强度和密度

从表 2 中可以看到,随着水胶比的增大,不参加纤维和掺加同种纤维的延性纤维增强混凝土的立方体抗压强度均下降,分别下降了 13%,12%,25%,22%,3%,7%,可以看出掺加第 2,3 种纤维的混凝土立方体抗压强度下降明显,其余强度下降比较缓慢。同时,随着水胶比增大,其密度也有所降低。

延性纤维增强混凝土直接拉伸试验结果 表 3

纤维编号	试件编号	初裂应力 /MPa	初裂应变 /%	峰值应力 /MPa	峰值应变 /%	极限拉应变 /%
1	1-26-1	2.784	0.040	2.955	0.122	0.536
	1-26-2	2.640	0.072	2.696	0.436	1.028
	1-26-3	3.797	0.132	4.340	0.240	0.972
	1-26-4	4.118	0.016	4.420	0.032	0.590
	1-29-1	3.993	0.024	4.050	0.056	0.940
	1-29-2	3.438	0.018	4.088	0.024	0.848
	1-29-3	3.982	0.016	4.294	0.028	0.656
2	2-26-1	5.436	0.014	5.969	0.240	0.844
	2-26-2	2.617	0.014	3.998	0.048	0.814
	2-26-3	3.269	0.178	4.157	0.422	0.900
	2-29-1	4.598	0.018	6.152	0.030	1.026
	2-29-2	6.310	0.002	7.189	0.206	0.904
	2-29-3	3.392	0.088	3.831	0.290	1.220
	2-29-4	4.836	0.092	7.146	0.348	1.184
3	3-26-1	3.079	0.014	4.178	0.028	0.806
	3-26-2	3.343	0.012	3.642	0.016	0.836
	3-26-3	3.993	0.007	4.046	0.008	0.944
	3-26-4	3.362	0.014	3.879	0.018	0.722
	3-29-1	3.593	0.002	3.880	0.025	0.766
	3-29-2	1.481	0.094	3.400	0.472	0.722
	3-29-3	3.143	0.002	3.445	0.126	0.888
4	4-26-1	3.287	0.021	5.761	0.137	0.276
	4-26-2	3.216	0.002	5.089	0.240	0.312
	4-26-3	1.449	0.005	4.230	0.152	0.260
	4-29-1	3.846	0.024	4.326	0.048	0.368
	4-29-2	3.553	0.002	3.762	0.012	0.330
	4-29-3	4.356	0.004	4.502	0.008	0.412
	5	5-26-1	5.938	0.097	6.220	0.305
5-26-2		6.008	0.039	6.856	0.288	0.945
5-26-3		4.770	0.027	5.020	0.102	0.924
5-29-1		5.478	0.031	5.970	0.206	1.770
5-29-2		5.200	0.095	6.291	0.221	1.376
5-29-3		6.432	0.021	6.680	0.220	1.466

3.2 拉伸应力-应变曲线

通过在混凝土中掺加 PVA 纤维使其具有假应变硬化特性。对比掺加 5 种不同纤维的混凝土拉伸应力-应变曲线可以看出,部分具有假应变硬化特性。由于 KURARAY K-II 纤维的直径、抗拉强度、弹性模量最大,从表 3 和图 3 中可以看到,掺加 KURARAY K-II 纤维的混凝土具有明显的假应变硬化性能,且初裂荷载、峰值荷载和极限拉应变均最大。

3.2.1 初裂强度和初裂应变

由表 3 和图 3 可以得出,掺加不同纤维的混凝土在水胶比为 0.26 时的平均初裂应力分别为 3.335,3.774,3.444,2.651,5.572MPa,水胶比为 0.29 时的平均初裂应力分别为 3.804,4.784,2.739,3.918,5.703MPa。随着水胶比由 0.26 增大到 0.29,掺加第 1,2,4,5 种纤维的混凝土平均初裂应力增大,且分别增大了 14.07%,26.76%,

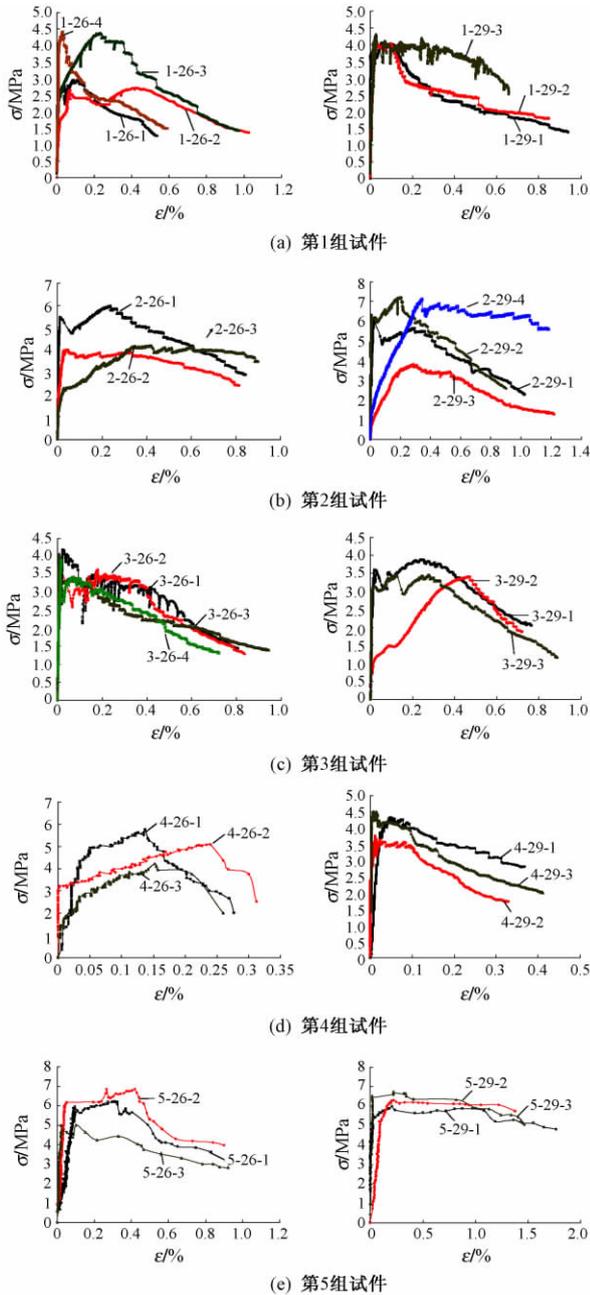


图3 延性纤维增强混凝土直接拉伸试验应力-应变曲线

47.79%和2.35%;而掺加第3种纤维的延性纤维增强混凝土初裂应力减小了20.47%。

在水胶比为0.26时,掺加第5种纤维的延性纤维增强混凝土的初裂应力分别是第1~4种纤维的1.671,1.476,1.618,2.102倍。在水胶比为0.29时,掺加第5种纤维的初裂应力是第1~4种纤维的1.499,1.192,2.082,1.456倍。

由表3和图3可以得出,掺加同种纤维的延性纤维增强混凝土初裂应变在水胶比为0.26时的平均初裂应变分别为0.065,0.068,0.012,0.009,0.054,水胶比为0.29时的平均初裂应变分别为0.019,0.050,0.033,0.010,0.049。随着水胶比由

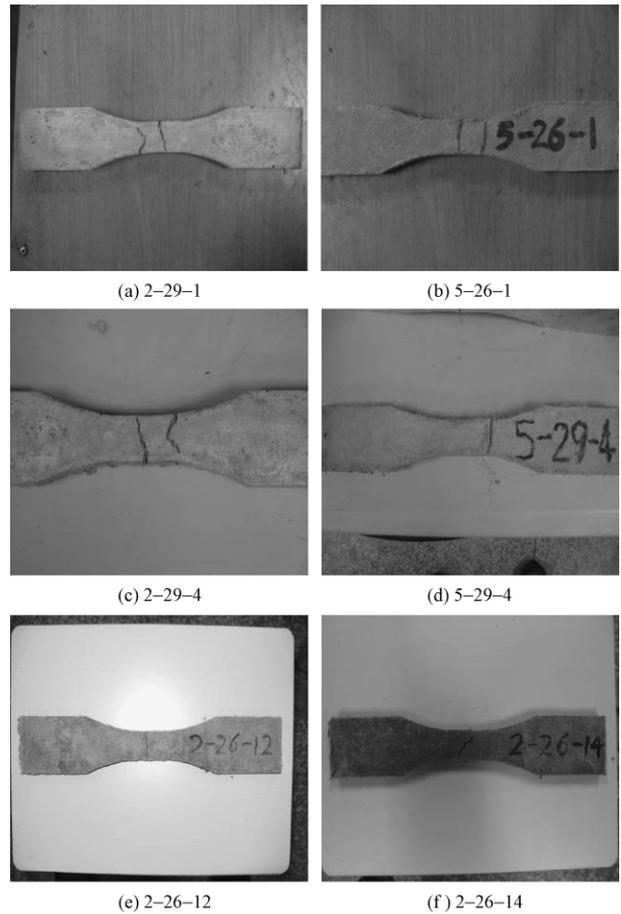


图4 部分延性纤维增强混凝土试件典型裂缝形式

0.26增大到0.29,掺加第1,2,5种纤维的混凝土平均初裂应变逐渐减小,且分别减小了70.77%,26.47%和9.2%;而掺加第3,4种纤维的混凝土平均初裂应变均逐渐增加,且分别增加了175%和11.11%。

综上所述,随着水胶比的增大,掺加第1,2,5种纤维的混凝土初裂应力和初裂应变的变化比较稳定,其中掺加第5种纤维的混凝土初裂应力最高。

3.2.2 峰值应力和峰值应变

混凝土的抗拉强度约是其抗压强度的1/10(普通混凝土)~1/20(高强混凝土^[15]),并且不与立方体抗压强度呈线性关系。在水胶比为0.26,0.29时普通混凝土的抗压强度分别为65.74,57.09MPa,则普通混凝土的抗拉应力约为6.57,5.71MPa,高强混凝土的抗拉应力约为3.29,2.86MPa。

混凝土强度等级为C50时,混凝土立方体抗压强度平均值理论上应为61.05MPa。在水胶比为0.26时,掺加和未掺加纤维的混凝土立方体抗压强度均大于61.05MPa,基于此,水胶比为0.26时,所配混凝土均为高强混凝土。而在水胶比为0.29时,只有第4种纤维配制的混凝土立方体抗压强度大于

61.05MPa,所以除第 4 种纤维外,其余配制的延性纤维增强混凝土均为普通混凝土。所以,在水胶比为 0.26 时,第 2、5 种纤维配制的延性纤维增强混凝土的抗拉强度大于普通混凝土的抗拉强度。在水胶比 0.29 时,第 4、5 种纤维配制的延性纤维增强混凝土的抗拉强度大于普通混凝土的抗拉强度。

由表 3 和图 3 可以得出,掺加同种纤维的延性纤维增强混凝土在水胶比为 0.26 时的平均峰值应力分别为 3.603、4.708、3.932、5.026、6.032MPa,水胶比为 0.29 时的平均峰值应力分别为 4.144、6.080、3.575、4.197、6.314MPa。掺加同种纤维的混凝土峰值应力分别变化了 15.02%、29.14%、-9.08%、-16.49% 和 4.68%。表明掺加第 1、2、4 种纤维的混凝土峰值应力变化较大,掺加其余纤维的混凝土峰值应力变化比较稳定。在水胶比为 0.26 时,掺加第 5 种纤维的混凝土的峰值应力是第 1~4 种纤维的 1.674、1.281、1.534、1.200 倍。在水胶比为 0.29 时,掺加第 5 种纤维的峰值应力是第 1~4 种纤维的 1.524、1.038、1.766、1.504 倍。

由表 3 和图 3 可以得出,峰值应变在水胶比为 0.26 时的平均峰值应变分别为 0.208、0.237、0.018、0.176、0.232,在水胶比为 0.29 时的平均峰值应变分别为 0.036、0.219、0.208、0.023、0.216。掺加同种纤维的混凝土峰值应变分别变化了 -82.69%、-7.59%、1.056%、86.93% 和 -6.90%。掺加第 5 种纤维的混凝土峰值应力和峰值应变的变化比较稳定并且峰值应力最高。

综上所述,随着水胶比的增大,掺加第 1、2、5 种纤维的混凝土峰值应力增大,掺加第 3、4 种纤维的混凝土峰值应力减小。而对于峰值应变,掺加第 1、2、5 种纤维的混凝土峰值应变减小,其余均在增大。掺加第 5 种纤维的混凝土峰值强度增大,峰值应变减小并且峰值强度最高。

3.3 极限拉应变

由表 3 和图 3 可以得出,掺加不同纤维的混凝土在水胶比为 0.26 时的平均极限拉应变分别为 0.782、0.853、0.827、0.283、0.900,在水胶比 0.29 时的平均极限拉应变分别为 0.815、1.084、0.792、0.370、1.537。随着水胶比的增大,掺加第 1、2、4、5 种纤维的混凝土极限拉应变逐渐增大,且分别增大了 4.22%、27.08%、30.74%、70.78%;而掺加第 3 种纤维的混凝土极限拉应变减小了 4.23%。

混凝土规范^[3]规定,结构设计时,普通混凝土和高强混凝土的极限压应变分别取 0.003 3 和 0.003,极限拉应变一般取 1.5×10^{-4} ,与高性能纤维

混凝土比较可以得出:在水胶比为 0.26 时,掺加不同纤维的混凝土极限拉应变比普通混凝土的极限压应变分别增大了 52.13、56.87、55.13、18.87、60 倍。在水胶比为 0.29 时,分别增大了 54.33、72.27、52.8、24.67 和 102.47 倍。

综上所述,随着水胶比的增大,掺加第 1、2、4、5 种纤维的延性纤维增强混凝土极限拉应变逐渐增大。在水胶比为 0.29 时,掺加第 2、5 种纤维的延性纤维增强混凝土的平均极限拉应变达到了 1% 以上,部分能达到 2% 以上,极限拉应变是普通混凝土极限拉应变的百倍以上。

4 影响延性纤维增强混凝土强度和变形性能的因素分析

4.1 纤维种类

单根纤维拔出试验^[16]结果表明,由于 PVA 纤维的亲水性,与基体的界面粘结具有很高的化学粘结力和摩擦粘结力。当纤维强度一定且界面粘结充分时,足够的纤维长度有助于基体内部开裂后内力的有效传递与分散,但在纤维体积率一定的情况下,纤维长度增大会使纤维分散性降低,并降低单位体积内纤维的数量,进而降低裂缝处总的桥联作用。同时,当基体中纤维埋入长度较大时,其较高的界面粘结力可提高材料的抗拉强度,但界面粘结力超过纤维抗拉强度时,纤维在拔出过程中可能出现断裂而降低材料的抗拉韧性。

根据表 1 所示,第 2 种和第 5 种纤维直径较大,同时,第 1 种纤维直径较小,但其长径比与第 5 种纤维基本相当,通过试验结果看到,掺加这 3 种纤维的混凝土均具有较为明显的假应变硬化特性。文[4]~[14]表明,配制延性纤维增强混凝土需要采用较高弹性模量的纤维,由表 1 和试验可以看出,第 5 种纤维弹性模量最高,材料性能最佳。

纤维在延性纤维增强混凝土中相当于混凝土的微细筋,因此,纤维本身的抗拉强度和延伸率等物理力学性能对延性纤维增强混凝土的拉伸应变硬化特性具有重要作用。

4.2 水胶比和砂胶比

通过表 2 可以看到,水胶比对抗压强度的影响较大,较高的水胶比会增加基体的孔隙率,从而降低界面处的粘结力和基体弹性模量,进而降低基体的立方体抗压强度。由于基体的立方体抗压强度随着水胶比的增大而减小,其脆性也随之降低,相应的延性增加,因此,极限拉应变随着水胶比的增大而增大。在满足抗拉强度和韧性的前提下应采用较低的水胶比,这也有助于提高纤维的分散性。但同时较

低的水胶比将使延性纤维增强混凝土的和易性较差,不利于试验和正常施工。通过对比试验选取两组水胶比(0.26和0.29),既能满足试验要求,也具有较好的和易性。

砂胶比对延性纤维增强混凝土抗压强度影响较小^[17],加入细砂可以提高胶凝材料的弹性模量,但过多的细砂会抑制其受拉应变硬化性能,降低材料延性。为了制备满足抗拉强度和韧性的延性纤维增强混凝土,配合比设计中应选用较低的砂胶比。同时,选用较细的河砂,虽然强度会降低,但是韧性会有所增加。

4.3 胶凝材料

粉煤灰能有效改善 PVA 纤维和 ECC 基体的界面,从而实现延性纤维增强混凝土的应变硬化特性。较低的粉煤灰掺量使其初裂强度和峰值强度较高,但应变较小。较高的粉煤灰掺量使其初裂强度和早期强度低,但应变硬化性能较为显著。通过本课题组大量的配合比试验,得出最优的粉煤灰掺量为占胶凝材料总量 50%。

5 结论

(1) 考虑到国内外企业生产各类 PVA 纤维的不同,选用 5 种不同的纤维配制延性纤维增强混凝土。对比掺加 5 种不同纤维的混凝土拉伸应力-应变曲线可以看出,部分具有应变硬化特性。PVA 纤维在延性纤维增强混凝土中相当于混凝土的微细筋,因此,PVA 纤维本身的抗拉强度和延伸率等物理力学性能对延性纤维增强混凝土的拉伸应变硬化特性具有重要作用。

(2) 不同的纤维对延性纤维增强混凝土抗压强度影响较小,同一种纤维配制的延性纤维增强混凝土随着水胶比增大,其立方体抗压强度均有明显降低,并且密度降低。

(3) 随着水胶比增大,第 3、4 种纤维配制的延性纤维增强混凝土的初裂应力-应变、峰值应力-应变变化较大,且单轴受拉的极限拉应变较低,应变硬化现象不稳定,因此第 3、4 种纤维不适合配制具有较高延性要求的延性纤维增强混凝土。

(4) 随着水胶比增大,第 1、2、5 种纤维配制的延性纤维增强混凝土的初裂应变、峰值应变均减小,极限拉应变增大。

(5) 由于第 5 种(KURARAY K-II)纤维的直径、抗拉强度、弹性模量最大,掺加第 5 种(KURARAY K-II)纤维的混凝土具有明显的应变硬化性能,性能最稳定,并且初裂荷载、峰值荷载和极限拉应变均最大。

参 考 文 献

- [1] 梁兴文,王社良,李晓文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [5] LIN Z, KANDA T, LI V C. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites [J]. Concrete Science Engineering, RILEM, 1999(1): 173-184.
- [6] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(6): 483-492.
- [7] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) - a review of the material and its applications [J]. Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [8] LI V C, WU H C, MAALEIM, et al. Tensile behavior of cement based composites with random discontinuous steel fibers [J]. Journal of the American Ceramics Society, 1996, 79(1): 74-79.
- [9] WANG S, LI V C. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites material design and performances [C]//Proceedings of International RILEM Workshop on HPRCC in Structural Applications Honolulu, Hawaii, U. S. A: RILEM Publications, 2005.
- [10] 徐世焯, 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.
- [11] 公成旭, 张君. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的拉伸性能[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 361-366.
- [12] WANG X G, WITTMANN F H, ZHAO T J. Comparative study of test methods to determine fracture energy of strain hardening cement-based composites (SHCC) [J]. Journal of Restoration of Buildings and Monuments, 2006, 12(2): 169-178.
- [13] 庞超明, LEUNG C K Y, 孙伟. 高掺量粉煤灰高延性水泥基复合材料的制备和性能[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2071-2077.
- [14] 李艳, 梁兴文, 刘泽军. 高性能生态型建筑材料 PVA-ECC 的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(4): 97-102.
- [15] 陈肇元, 朱金栓, 吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [16] KANDA T, LI V C. Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix [J]. ASCE, Journal Materials in Civil Engineering, 1998, 10(1): 5-13.
- [17] LI V C, MISHRA D K, WU H C. Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites [J]. Materials and Structures, 1995, 28(183): 586-595.