

PV A纤维增强水泥基复合材料拉伸特性试验研究

高淑玲, 徐世[✉]

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 初步配制了 PV A纤维水泥基复合材料, 对使用原材料的性能、投料顺序和搅拌工艺进行了详细的描述; 测定了各个配比的坍落扩展度, 揭示掺加纤维后流动性减小的原因是由于 PV A纤维有亲水性, 纤维表面吸附了大量的自由水分子; 利用外夹式单轴直接拉伸试验得到了硬化的应力-应变全曲线, 观察到多条裂缝的出现, 极限拉应变达到 0.7%, 大约是混凝土的 70倍; 根据试验数据得出基体和纤维掺量对极限拉应变、峰值应力和断裂能都产生影响, 最后对假硬化的应力-应变全曲线进行了分析, 所得结论为高韧性、高耗能材料的配制提供了大量的试验和理论依据。

关键词: 坍落扩展度; 假应变硬化; 水泥基复合材料; PV A

中图分类号: TU528.58 **文献标识码:** A

0 引言

水泥基体材料属脆性材料, 抗拉强度极低, 其在结构中的使用受到限制, 可以通过掺加纤维以增加水泥基材料的韧性。传统的纤维混凝土 (FRC) 在一定程度上减轻了这种脆性, 但还是出现张拉软化特性。因此在过去的 10年中, 对高性能纤维增强水泥基复合材料的研究开展得非常迅速^[1,2]。高性能纤维增强水泥基复合材料在单轴张拉过程中出现肉眼可见的假应变硬化特性, 伴随着假应变硬化出现多条裂缝, 比较低的纤维掺量 (2% 左右) 就可以获得比较高的极限拉应变, 材料有着高韧性和很大的能量吸收能力, 这些都是与传统的 FRC不同的。要想得到硬化的应力-应变关系要求纤维的弹性模量远远高于基体的弹性模量, 其中 PV A纤维的抗拉强度和弹性模量都较高, 且与波特兰水泥有良好的化学相容性, 亲水性好, 能使 PV A均匀分散在水泥基中, 另外 PV A耐酸碱性好, 适用于各种等级的水泥, 能保证复合材料的耐久性^[3]。本文采用 PV A纤维, 初步配制 PV A纤维增强水泥基复合材料, 配制工艺与一般纤维混凝土相似。轴拉试验是获得单轴拉伸应力-应变关系曲线惟一可行的方法, 但其试验方

法非常复杂, 到目前为止尚无普遍认同的试验方法^[4,5], 本文只讨论利用外夹式直接拉伸试验来测定假应变硬化的应力-应变全曲线。

1 试验方法与过程

1.1 试件设计与材料

直接拉伸试件尺寸为 305 mm× 76 mm× 13 mm, 每组配比浇注 6个试件。单轴抗压试验试件为直径 76 mm高 152 mm的圆柱体。每组配比至少保证 3个试件。采用绝对体积法配制, 灰砂比 2, 水胶比 0.426, 配合比见表 1^[6]。

试验中水泥采用 52.5R普通硅酸盐水泥; 细骨料为优质硅砂, 粒径 45~ 75目, 密度 2.6 g/cm³; 硅粉采用挪威埃肯 (Elkem) 微硅粉 920U; 粉煤灰采用 I级粉煤灰; Sika-II高效减水剂; 有机硅类 PRS-6E消泡剂。

PV A纤维采用日本 Kuraray Co. 产 K-II可乐纶, 纤维长度 12 mm, 弹性模量 29.12 GPa, 伸长率 7%, 抗拉强度 1 092 MPa, 密度 1.3 g/cm³。

高强度 PV A纤维与水泥基质间有良好的界面键合力, 是由于该纤维的非环形和不规则截面有助于扩大 PV A与水泥基质的成键; PV A纤维

收稿日期: 2005-08-19; 修回日期: 2006-12-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (重点项目 50438010).

作者简介: 高淑玲 (1977-), 女, 博士; 徐世[✉] (1953-), 男, 教授, 博士生导师.

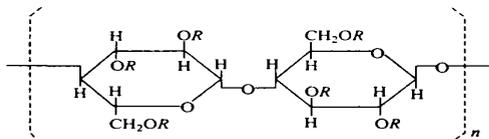
表 1 配合比
Tab. 1 Mix proportions

编号	d/(kg·m ⁻³)				w/%			c _f /%	
	水泥	水	粉煤灰	硅灰	砂	减水剂	增稠剂		消泡剂
F-2	1 070	450			536	0.8	0.15	0.08	2
F-0	1 070	450			536	0.8	0.15	0.08	0
FA-2	962	450		108	536	0.8	0.15	0.08	2
FA-0	962	450		108	536	0.8	0.15	0.08	0
SF-P-2	962	450	108		536	0.8	0.30	0.08	2
SF-2	962	450	108		536	0.8	0.15	0.08	2
SF-1.5	962	450	108		536	0.8	0.15	0.08	1.5
SF-1	962	450	108		536	0.8	0.15	0.08	1
SF-0	962	450	108		536	0.8	0.15	0.08	0

的分子结构式为 $(-CH_2-CHOH-)_n$, 其中 $-OH$ 基团可与水泥水化物中的 $-OH$ 基团形成牢固的氢桥^[3].

增稠剂采用 60HD4000 (hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC). 分子组成与结构式见图 1.

HPMC 呈良好的颗粒形态分布, 可与水泥形成“黄金搭档”, 明显改善此水泥基复合材料的微级配; 且可提高纤维与基体间的粘结强度, 使得试件或结构开裂后纤维在拔出过程中消耗更多的能量, 这对有抗震要求的结构非常有意义^[7].



式中 n 为聚合度, R 为 $-H$ 、 $-CH_3$ 、 $-(CH_2CH(CH_3)O)_x$, H 或 $-(CH_2CH(CH_3)O)_x$, CH_3

式中 n 为聚合度, R 为 $-H$ 、 $-CH_3$ 、 $-(CH_2CH(CH_3)O)_x$, H 或 $-(CH_2CH(CH_3)O)_x$, CH_3

图 1 HPMC 的分子式

Fig. 1 Molecular formula of HPMC

1.2 试件制作

采用 UJZ-15 砂浆搅拌机, 搅拌筒容量 15 L, 搅拌筒内径 $\varnothing 380$ mm \times 250 mm, 本试验采用逆时针旋转进行搅拌, 转速 (60 ± 2) r/min.

先把减水剂和消泡剂称量好后一同放入称量好的水中溶解, 掺合料(硅灰或粉煤灰)、砂子、水泥和 HPMC 倒入搅拌筒内干拌 8 min, 然后加入溶有减水剂和消泡剂的水湿拌 8 min, 最后用手沿着搅拌筒旋转方向慢慢加入纤维, 搅拌 12

min, 直到纤维分散均匀为止. 经试验发现: 在水泥颗粒中先加入 HPMC 干拌混和, 其拌和物的流动性比湿拌以后再加 HPMC 好. 这种投料顺序和搅拌方法既不使 HPMC 产生凝聚现象, 又节省了搅拌时间.

直接拉伸试件采用有机玻璃模具, 为确保两个承载面水平且平行, 试件水平放置浇筑, 承载面的平坦度和偏斜度可允许的最大偏差为 0.05 mm. 抗压强度试件采用钢模垂直浇筑, 并保证浇筑面与下承载面平行. 浇筑面即试件上表面在拌和物初凝前约 1~2 h 内平抹. 平抹之后, 用塑料薄膜把试件盖住. 试件浇筑 1 d 后脱模, 放进水箱内在常温下养护 28 d. 抗压试件需在 14~28 d 中把浇筑面磨平, 然后放入水箱内继续养护, 试验前提前 3 d 把试件从水箱里面拿出来晾干.

1.3 试验过程

目前混凝土直接拉伸试验可分为外夹式、内埋式和粘贴式三种方式^[4,5], 本试验采用外夹式.

为避免试件在夹持部位破坏, 试件两端用建筑结构胶粘有 0.6 mm 厚的铝片.

试验在 1 000 kN 微机控制液压伺服试验机上进行, 采用等速位移 0.06 mm/min 进行控制, 用两个 DA-10 型的 LVDT 测量拉伸长度变化, 测量标距为 205 mm.

图 2 为拉伸试验装置图.

直接拉伸试件应变片 1 2 3 的标距为 20 mm, 粘贴位置见图 3.

圆柱体轴心抗压强度试验在 300 kN 微机控制液压伺服试验机上采用等速力控制完成.

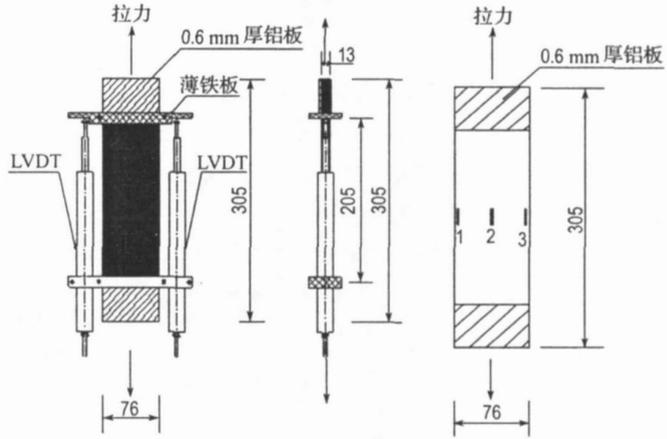
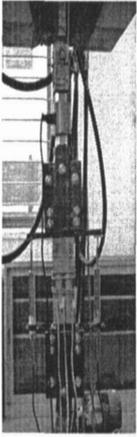


图 2 直接拉伸装置图

图 3 直接拉伸应变片粘贴位置

Fig. 2 Sketch of direct tension device

Fig. 3 Bending position of the strain gauge in direct tension

2 结果与讨论

2.1 坍落扩展度

试验采用坍落筒底部直径为 200 mm,上部直径为 130 mm,高度为 200 mm.

图 4 与图 5 为 SF-0 与 SF-2 的坍落扩展度的测量.

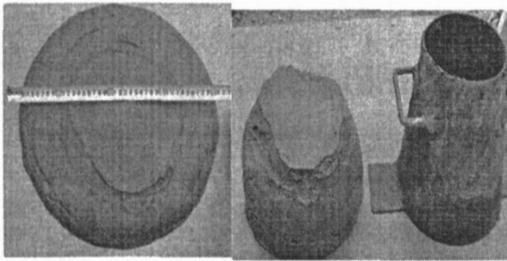
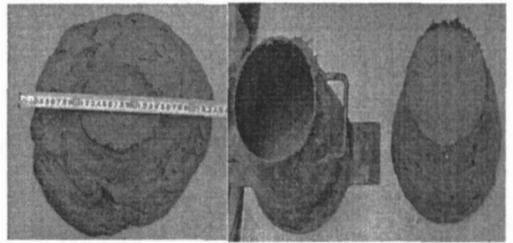


图 5 SF-2 的坍落扩展度

Fig. 5 Slump flow of SF-2

图 4 SF-0 的坍落扩展度

Fig. 4 Slump flow of SF-0

由图 5 可见,掺加纤维后,材料均匀性变差,空隙增加,流动性减小.

表 2 为各配合比的坍落扩展度和抗压强度试验结果.

由表 2 可见,掺加硅灰后, SF-0 的坍落扩展度比 F-0 小, SF-2 的坍落扩展度比 F-2 小,其流动性减小;

表 2 各配合比的坍落扩展度和抗压强度

Tab. 2 Slump flow and compression strength of each mix proportion

编号	$L_h \times L_v$ / (mm × mm)	t	纤维分散性	f_{28} / MPa
F-2	380 × 400	干拌 8 min, 湿拌 4 min, 加纤维后搅拌 12 min	好	31.25
F-0	520 × 520	干拌 8 min, 湿拌 4 min		48.00
SF-P-0	320 × 320	干拌 8 min, 湿拌 8 min		
SF-P-2	270 × 270	干拌 8 min, 湿拌 8 min, 加纤维后搅拌 12 min	好	24.21
SF-2	340 × 350	干拌 8 min, 湿拌 8 min, 加纤维后搅拌 12 min	好	33.48
SF-1.5	430 × 430	干拌 12 min, 湿拌 12 min, 加纤维后搅拌 12 min	好	40.85
SF-1	410 × 400	干拌 8 min, 湿拌 8 min, 加纤维后搅拌 8 min	好	43.45
SF-0	420 × 430	干拌 8 min, 湿拌 8 min		47.67
FA-2	430 × 440	干拌 8 min, 湿拌 8 min, 加纤维后搅拌 12 min	好	33.41

掺加粉煤灰后, FA-2 的坍落扩展度比 F-2 增加, 对增加流动性有益;

SF-P-2 的坍落扩展度比 SF-2 的小, 可见随着 HPMC 掺量的增加流动性减小;

SF-0 SF-1 SF-2 的坍落扩展度值依次减小, 可见随着纤维掺量的增加, 流动性减小.

图 6 揭示了掺加纤维后流动性减小的微观机理: 由于 PV A 纤维有亲水性, 纤维表面吸附了大量的自由水分子, 使得流动性减小.

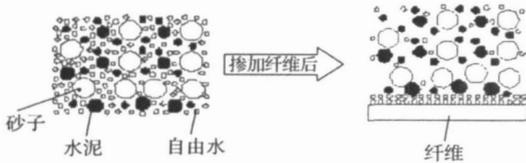


图 6 掺加纤维后流动性减小微观机理图

Fig. 6 Micromechanical sketch of flowability decreasing by the addition of fiber

2.2 抗压强度

从表 2 可以看到, 随着纤维掺量的增加, SF-0 SF-1 SF-1.5 SF-2 的 28 d 抗压强度逐渐降低; SF-2 FA-2 的抗压强度都略大于 F-2, 表明掺加硅灰或粉煤灰后, 28 d 抗压强度略有增加.

2.3 直接拉伸应力-应变曲线

图 7 分别是 F-0 F-2 FA-2 SF-2 和 SF-P-2 的应力-应变曲线, 图 7(a) 中, 试件荷载达到最大后, 试件突然脆断. 掺加纤维的试件中 FA-2 的应力-应变曲线最稳定.

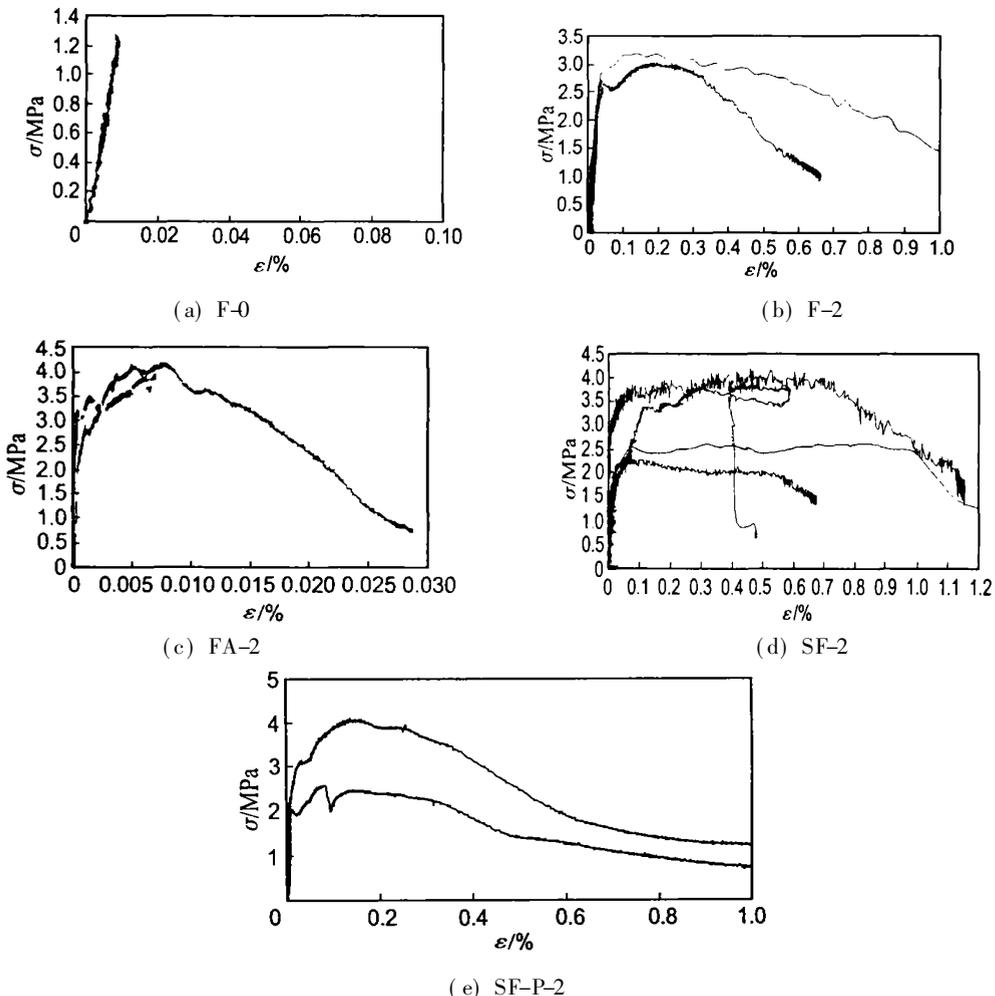


图 7 直接拉伸试件的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of direct tension specimens

图 8 为 FA-2 的 3 个应变片的应力 - 应变曲线,图中 3 个应变片的应力 - 应变曲线非常接近,初始弹模相近,表明直接拉伸试件受力是均匀的。

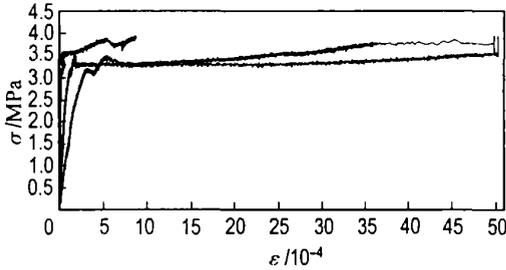


图 8 FA-2 应力 - 应变图

Fig. 8 The stress-strain curve of FA-2

直接拉伸试验结果见表 3. 掺加硅灰、粉煤

表 3 直接拉伸试验结果

Tab. 3 Experimental result of direct tension

编号	e_p /MPa	e_{ss} /MPa	X_b /%	X_{cu} /%	E /GPa	n	A /($10^3 N \cdot m^{-1}$)
F-0	1.28			0.002 4	50.00	1	
F-2	3.17	2.69	0.038	0.2	7.19	> 6	5.404
SF-0	1.02			0.001 9	53.70	1	
SF-P-2	4.12	2.18	0.078	0.14	2.79	> 2	9.876
SF-2	3.97	2.73	0.002 5	0.3	7.55	> 2	2.744
SF-1	2.41	1.83	0.015	0.09	11.91	> 1	
FA-2	4.14	3.12	0.064	0.7	7.08	> 7	16.353

注: e_p 代表抗拉强度; e_{ss} 代表出现第一条裂缝时的开裂强度; X_{cu} 代表极限拉应变; X_b 为出现第一条裂缝时对应的应变值; E 为初始抗拉弹性模量; n 为卸载后出现的裂缝条数

掺加纤维后,出现第一条裂缝时对应的应变值大于基体的极限拉应变;基体的初始抗拉弹性模量在 50 MPa 左右,掺加纤维后弹性模量下降到几个 MPa,可见掺加纤维后刚度降低,韧性增加很大;抗拉应力达到峰值时出现的裂缝条数最多,峰值后有些微小裂缝又闭合,裂缝条数减少.纤维掺量 2% 时,卸载后裂缝条数都大于 1,其中 FA-2 的裂缝条数大于 7 条,裂缝条数最多, F-2 的裂缝条数大于 6 条,而 SF-2 的裂缝条数大于 2,可见掺加粉煤灰后的裂缝条数最多。

3 拉伸应力 - 应变曲线分析

3.1 双线性模型

图 7 所示应力 - 应变曲线显示了 PV A 纤维水泥基复合材料的假应变硬化的特征,并伴随肉眼

灰后, SF-2 FA-2 的开裂强度、抗拉强度和极限拉应变都大于 F-2,其中掺加粉煤灰 (FA-2) 后增加得最大;掺加硅灰系列中,比较纤维掺量为 1% 的试件 SF-1 和纤维掺量为 2% 的试件 SF-2,可见随着纤维掺量的增加开裂强度、极限抗拉强度和极限拉应变都增大。

表 3 中符号 A 代表直接拉伸应力 - 位移曲线包围的面积,断裂能是单轴直接拉伸试验应力 - 裂缝张开位移曲线包围的面积, A 值间接反映了试件断裂能的大小. FA-2 的 A 值大于 F-2 SF-2 SF-P-2,是它们的 2~ 6 倍,可见 FA-2 系列的断裂能最大。

可见多条裂缝的出现,下列模型可以用来解释假应变硬化曲线。

图 9^[8] 为假应变硬化材料直接拉伸应力 - 应变曲线的双线性模型,图 10 为普通混凝土、纤维混凝土和 PV A 纤维增强水泥基复合材料 (双线性模型) 的应力 - 应变曲线比较图。

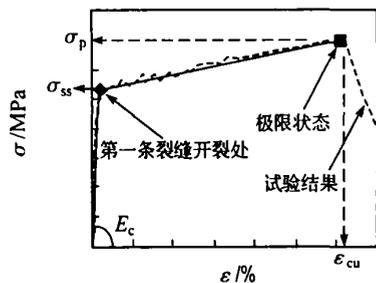


图 9 应力 - 应变曲线的双线性模型^[8]

Fig. 9 Bilinear model of stress-strain curve

图 10 中普通混凝土与半脆性纤维混凝土出现单条裂缝后裂缝迅速扩展、贯通,荷载达到最大后迅速下降。

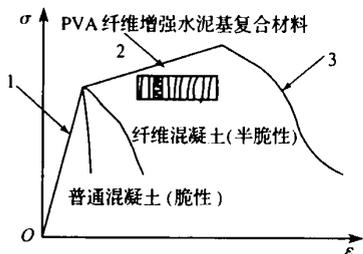


图 10 水泥基复合材料中不同的抗拉破坏模型

Fig. 10 Different tension damage model of cementitious composites

PV A 纤维增强水泥基复合材料中 1 部分为弹性阶段,此时试件没有开裂,跟普通混凝土和纤维混凝土的上升段曲线形状相同,在 1 部分的顶点处出现第一条裂缝。

2 部分为多条裂缝开展阶段,1 顶点出现第一条裂缝后,这条裂缝并没有贯通,而是在第一条裂缝附近产生了很多条细小裂缝,而且在整个试件范围内产生其他的裂缝,此时荷载和应变都继续增加,在 2 顶点处,多条裂缝开展结束,此时裂缝条数最多。

3 部分为荷载达到峰值以后部分,此时主裂缝开口宽度越来越大,裂缝贯通整个试件,荷载减小,部分微小裂缝闭合。

与普通混凝土不同的是, PV A 纤维增强水泥基复合材料拉伸荷载达到峰值后不是突然下降,而是稳定缓慢下降的,因此可以得到整个加载过程全部的应力-应变曲线。

3.2 三线性模型

图 11^[9] 给出了假应变硬化材料直接拉伸应力-应变曲线的三线性模型,由图 11 知可以把图 7 中 (b)、(c)、(d)、(e) 的应力-应变曲线分为四个应变区域:

区域 I,材料发生线弹性变形,没有贯通裂缝出现,与双线性模型相同;

区域 II,出现多条裂缝,随着裂缝条数的增加,应变增加,但裂缝宽度保持不变;

区域 III,多条裂缝的开展完毕,此时的应变增加主要得益于纤维的阻裂作用,裂缝宽度增加,荷载此时主要用来拉断或者拔出纤维;

区域 IV,纤维拔出或者拉断。

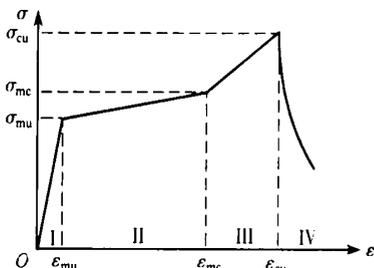


图 11 应力-应变曲线三线性模型^[9]

Fig. 11 Trilinear model of stress-strain curve

4 结 论

(1) 本文采用绝对体积法初次试配了 PV A 纤维增强水泥基复合材料,对材料的投放顺序和搅拌工艺进行了详细的描述,并考虑了其对流动性的影响。

(2) 讨论了不同掺合料对流动性、抗压强度、直接拉伸应力-应变曲线及其试验结果的影响。

(3) 本文配制的 PV A 纤维增强水泥基复合材料的极限拉应变最大可到 0.7%,是普通混凝土的 70 倍,其中掺加 10% 粉煤灰的 FA-2 系列的增韧效果最好。

(4) 随着纤维掺量增加,28 d 抗压强度降低;掺加粉煤灰/硅灰后,抗压强度略有增加。

(5) PV A 纤维增强水泥基复合材料的拉伸应力-应变曲线可以用双线性模型和三线性模型来解释。

(6) 拉伸过程中普通混凝土很难得到稳定的下降段, PV A 纤维增强水泥基复合材料可以得到比较稳定的下降段。

参考文献:

[1] LI V C, WANG Shu-xin, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PV A-ECC) [J]. *ACI Mater*, 2001, 98(6): 483-492

[2] 陈 婷,詹炳根. 设计 PV A 纤维水泥基复合材料的

- 研究进展 [J]. 混凝土, 2003(11): 3-6
- [3] 吴李国. PV A 纤维的应用现状及进展 [J]. 现代纺织技术, 2001, 9(4): 52-54
- [4] 张林俊, 宋玉普, 吴智敏. 混凝土轴拉试验轴拉保证措施的研究 [J]. 实验技术与管理, 2003, 20(2): 99-124
- [5] 顾惠琳, 彭 勃. 混凝土单轴直接拉伸应力-应变全曲线试验方法 [J]. 建筑材料学报, 2003, 6(1): 66-71
- [6] LI V C, MISHRA D K, WU Hwai-chung. Matrix design for pseudo-strain-hardening fiber reinforced cementitious composites [J]. *Mater and Struct*, 1995, 28: 586-595
- [7] 王起才. 增稠剂对钢纤维混凝土性能的影响 [J]. 兰州铁道学院学报, 1997, 16(3): 12-16
- [8] KANDA Tetsushi, LIN Zhong, LI V C. Tensile stress-strain modeling of pseudostrain hardening cementitious composites [J]. *J of Mater in Civil Eng*, 2000, 12(2): 147-156
- [9] LI V C. Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites [C]// SWAMY R N. *Proceedings of 4th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete*. London: E & FN Spon, 1992: 12-30

Experimental research on tension property of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites

GAO Shu ling, XU Shi tang*

(State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract Experimental research is undertaken to make polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composites. The test material performance used, mixing method and mixing technology of test material are described in detail. The slump flow of each mix proportion is got. And the reason that the flowability is decreasing by the addition of the fiber is that fiber surface adsorbs amount of freed water molecules owing to the hydrophilic of PV A fiber. In addition, the pseudo-strain-hardening stress-strain curves are got in uniaxial direct tension, and multicracking appears. The ultimate tensile strain reaches 0.7% which is 70 times of the plain concrete. The influences of matrixs and the fiber volume on slump flow, ultimate tensile strain, peak stress and fracture energy are analyzed by experimental data. At last, the pseudo-strain-hardening stress-strain curves are discussed. The analytical and experimental conclusions can provide a lot of experimental and theoretical bases for making the composites hold the high ductility and high energy consumption ability.

Key words slump flow; pseudo-strain-hardening; cementitious composites; polyvinyl alcohol