

混杂聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料力学性能

潘钻峰¹, 汪 卫², 孟少平³, 乔 治³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中信建筑设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014;

3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 目前配置 ECC(engineered cementitious composites, ECC)的聚乙烯醇纤维(polyvinyl alcohol, PVA)主要由日本可乐丽公司生产, 成本较高. 国产 PVA 价格合理, 但国产 PVA-ECC 的拉伸延性有限, 为了进一步提高水泥基复合材料的拉伸延性, 兼顾应用成本, 将国产 PVA 纤维和日本产 PVA 纤维以一定的比例混合, 配制混杂 PVA-ECC, 为实际工程结构性能提升提供更多的材料选择. 首先基于微观力学模型, 确定混杂 PVA-ECC 中 PVA 纤维的体积分数, 对设计的 5 组不同配合比的混杂 PVA-ECC 试件进行四点弯试验、单轴拉伸试验及单轴压缩试验, 确定混杂 PVA-ECC 的较优配合比. 最后对典型配合比 ECC 进行性能和成本对比分析, 提出了低成本、较低拉伸性能的配合比 M7, 中等成本、较高拉伸性能的配合比 M17 和高成本、高拉伸性能的配合比 M21 等 3 个具有代表性的配合比, 供实际工程根据结构性能的需要进行选择. 采用混杂 PVA 纤维配置 ECC, 可降低 ECC 的成本, 使得 ECC 大量应用于工程实践成为可能.

关键词: 工程用水泥基复合材料(ECC); 混杂聚乙烯醇(PVA)纤维; 配合比; 准应变硬化

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

mixed with Japanese one at a proper proportion to develop hybrid PVA-ECC. Based upon the micromechanics model, the mix proportion was redesigned through the parametric analysis. The four-point bending test, uniaxial tensile test and uniaxial compressive test were carried out to characterize the mechanical behavior of hybrid PVA-ECC with five mix proportions. According to the performance and cost of the material, three typical mixes were proposed: M7 with low cost, relatively low tensile ductility and reinforced by domestic PVA fiber, M17 with moderate cost, relatively high tensile ductility and reinforced by hybrid PVA fiber and M21 with high cost, high tensile ductility and reinforced by Japanese PVA fiber. In practical applications which mix to be chosen depends on the structural performance to be achieved. The development of hybrid ECC helps cut costs of ECC, and the widespread use of ECC becomes possible.

Key words: engineered cementitious composites (ECC); hybrid polyvinyl alcohol (PVA) fiber; mix proportion; pseudo strain hardening

Study on Mechanical Properties of Hybrid PVA Fibers Reinforced Cementitious Composites

PAN Zuanfeng¹, WANG Wei², MENG Shaoping³, QIAO Zhi³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430014, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: At present, the PVA (polyvinyl alcohol) fiber used in ECC (engineered cementitious composites) mainly produced by KURARAY Co. Ltd., Japan, and its cost is very high. The price of domestic PVA fiber is reasonable, however, the tensile ductility of the domestic PVA-ECC is limited. To further increase the tensile ductility of ECC, looking after both side the cost, domestic PVA fiber was

ECC(engineered cementitious composites)是一种具有高延性、高韧性和多缝开裂特征的纤维增强水泥基复合材料, 满足可持续发展社会对基础设施建设高安全性和高耐久性的要求. ECC 是密歇根大学的 Victor C. Li 教授等^[1]在 20 世纪 90 年代初根据细观力学和断裂力学基本原理设计的短纤维增强水泥基复合材料, 它以水泥、矿物掺合料以及粒径不大于 0.15 mm 的石英砂作为基体, 用纤维做增强材料, 在纤维体积分数不大于 2% 的情况下, 直接拉伸试验得到的极限拉应变可达 3% 以上, 且拉伸过程中形成许多宽度小于 100 μm 的细裂缝. 最初, Victor C. Li 等采用聚乙烯纤维 (polyethylene, PE) 配制 ECC; 1997 年 Kanda 和 Li 开始将聚乙烯醇纤维

收稿日期: 2013-12-22

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51208093); 教育部博士点基金(20120092120021); 国家重点实验室开放基金(2012CEN006)

第一作者: 潘钻峰(1981—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要研究方向为 ECC 结构与混凝土结构. E-mail: zfp@tongji.edu.cn

(polyvinyl alcohol, PVA)用于 ECC,制成了 PVA-ECC^[2]. PVA 纤维亲水、无毒、环保,其成本是等体积高弹性模量 PE 纤维的 1/8 左右,且低于钢纤维,高强高弹性模量 PVA 纤维的抗拉强度和弹性模量均高于聚丙烯(polypropylene, PP)纤维. 目前国内外对 ECC 的研究主要集中在 PVA-ECC.

目前配制 ECC 的 PVA 纤维主要由日本的可乐丽公司生产,成本较高,使 ECC 在工程中大规模应用十分困难. 事实上,我国 PVA 纤维的质量和生产规模均达到了国际先进水平,国产 PVA 纤维的单位成本较低,其配制的 ECC 每立方米的成本为普通混凝土的 2 倍,而相同情况下利用日本产 PVA 纤维的成本则是普通混凝土的 10 倍左右. 2 种纤维的物理力学性能参数对比如表 1 所示. 国产 PVA 纤维按目前常用配合比不能配置出具有优异性能 ECC 的主要原因是其与水泥基体的黏结作用太强,在拔出过程中易拉断,从而不能满足准应变硬化条件,所以国产 ECC 的配合比需要重新设计. 根据 ECC 的材料设计理论,对采用国产 PVA 配置 ECC 的可行性进行了探讨,通过 11 组不同配合比的 ECC 力学性能试验研究^[3]使优化后的国产 PVA-ECC 的极限拉应变可达 0.5%,较普通混凝土有较大改善,同时抗压强度也在 30MPa 左右,一定程度上满足实际工程的应用要求. 但实际工程中可能对复合材料的拉、压性能提出更高的要求,为了进一步提高复合材料的拉伸延性,兼顾应用成本,将国产 PVA 纤维和日本产 PVA 纤维以一定的比例混合,配制混杂 PVA-ECC. 目前将不同力学性能的纤维进行混合配制 ECC 的较少. 日本东北大学 Ahmed 等^[4]利用钢纤维和 PE 纤维进行了混合纤维增强 ECC 研究. 国内罗百福^[5]尝试利用碳纤维与 PVA 纤维混杂改善低水胶比 ECC 材料的韧性和延性. 邓宗才等^[6]将国产 PVA 纤维与美国纤维素纤维混杂配置高韧性水泥基复合材料,研究其收缩变形.

表 1 国内外纤维的物理和力学性能对比

Tab. 1 Comparison of physical and mechanical properties of domestic and Japanese PVA fiber

纤维来源	直径/ μm	长度/ mm	伸长率/ %	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	拉伸强度/ MPa
国产	26	12	7	1.3	36.3	1 560
日本产	39	12	7	1.3	42.8	1 620

本文将国产典型 PVA 纤维与日本可乐丽产 PVA 纤维按一定比例混合,配置混杂 PVA-ECC. 根据配制 ECC 的准应变硬化模型及其性能参数,结合纤维分散性的要求,确定了混杂 PVA-ECC 中日本

产 PVA 纤维和国产 PVA 纤维的体积分数,设计了 5 组配合比研究其力学性能,最后对制得的典型配合比进行性能成本对比分析. 相比以往采用日本产 PVA 纤维配置 ECC,混杂 PVA-ECC 可降低成本,有利于 ECC 的推广应用.

1 混杂 PVA-ECC 配合比设计

1.1 准应变硬化模型

ECC 的材料设计理论以断裂力学、细观力学为基础. 1992 年, Li 和 Wu^[7]研究了随机分布短纤维增强水泥基复合材料的纤维桥接模型,并据此提出了此类材料在单轴拉伸作用下发生应变硬化和多缝开裂的准应变硬化模型^[8],该模型由开裂强度准则和稳态开裂准则组成.

(1) 开裂强度准则. 该准则要求构件在轴向拉伸时的初始开裂应力 σ_{fc} 必须小于最大桥接应力 σ_0 , 否则,开裂截面将会由于纤维的断裂或者拔出而失去承载力. 该准则表达式如下:

$$\sigma_{\text{fc}} \leq \sigma_0 \quad (1)$$

(2) 稳态开裂准则. 1988 年 Marshall 和 Cox^[9]研究得到稳态开裂时裂缝推动力 J_{b} (外力所做功与纤维伸长所吸收能量之差) 等于裂缝尖端断裂韧度 J_{tip} , 即

$$J_{\text{tip}} = \sigma_{\text{ss}} \delta_{\text{ss}} - \int_0^{\delta_{\text{ss}}} \sigma(\delta) d\delta \quad (2)$$

且要求

$$\sigma_{\text{ss}} \leq \sigma_0 \quad (3)$$

式中: δ 为裂缝开口宽度; $\sigma(\delta)$ 为裂缝开口宽度 δ 对应的纤维桥接应力; σ_{ss} 为稳态开裂应力; δ_{ss} 为 σ_{ss} 对应的裂缝开口宽度.

根据式(2)和式(3), J_{tip} 必须小于纤维桥联区的能量消耗即余能 J'_{b} , 从而有

$$J_{\text{tip}} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta = J'_{\text{b}} \quad (4)$$

式中: δ_0 为最大桥接应力 σ_0 对应的裂缝开口宽度.

图 1 清晰地表达了稳态开裂准则,即要求阴影部分的面积 J_{tip} 小于 J'_{b} . $J'_{\text{b}}/J_{\text{tip}}$, $\sigma_0/\sigma_{\text{fc}}$ 同时大于 1 即可使复合材料出现应变硬化和多缝开裂. 但考虑到纤维与基体属性的离散性,为保证复合材料能稳定地呈现准应变硬化特性和饱和多缝开裂特征, Kanda 和 Li^[10]通过理论分析和试验验证相结合的方法,建议 PVA-ECC 的性能参数为: $J'_{\text{b}}/J_{\text{tip}} > 3$ 和 $\sigma_0/\sigma_{\text{fc}} > 1.45$. 采用国产典型 PVA 纤维配制 ECC 主要是能量准则难以满足,可增大基体水灰比或增加粉煤灰

掺量以降低 J_{tip} 使 J'_b/J_{tip} 增大. 上述准应变硬化模型同样适用于混杂 PVA-ECC 的设计. 结合国产 PVA-ECC 的试验结果^[3], 初步假定水胶比(两者质量比)为 0.28, 以获得较高抗压强度; 假定粉煤灰掺量(粉煤灰掺量与水泥用量质量比)为 2.4, 一定程度上改善纤维与基体界面的黏结作用. Yang 等^[11]研究了大体积掺入粉煤灰对 ECC 力学性能的影响, 并测定了水胶比为 0.26 时不同粉煤灰掺量时纤维与基体界面的化学黏结、摩擦黏结和滑移硬化系数的大小.

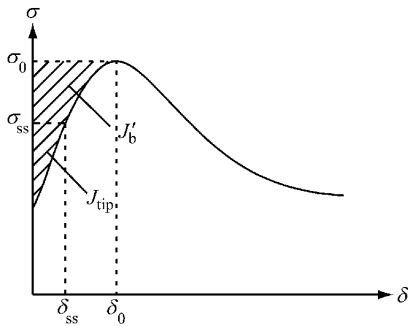


图1 典型的纤维桥接应力-裂缝开口宽度曲线

Fig.1 Typical relationship between fiber bridging stress and crack opening width

依据文献^[12], 日本产 PVA 纤维在较高粉煤灰掺量下的界面属性为: 化学黏结取 $1.5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, 摩擦黏结取 1.0 MPa ; 结合文献^[11]和文献^[12], 国产 PVA 纤维在相同配比基体中的界面属性为: 化学黏结取 $2.5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, 摩擦黏结取 1.5 MPa . 采用 Lin 等^[13]修正的准应变硬化模型对混合纤维配制的复合材料进行理论分析. 假定纤维总体积分数为 1.6% 不变而国产 PVA 纤维体积分数 V_f 变化(为 0, 0.2%, ..., 1.6%)时复合材料截面的纤维桥接应力-裂缝开口宽度关系如图 2 所示, 图 2 中 σ_b 为纤维桥接应力. 截面的峰值桥接应力 σ_0 及复合材料的余能 J'_b 与国产纤维体积分数的关系如图 3.

从图 2 和图 3 可见, 随着国产 PVA 纤维体积分数的增加, 复合材料的截面桥接关系曲线变得越来越陡峭, 峰值桥接应力逐渐增大, 而对应的裂缝开口宽度逐渐变小, 这主要是由于国产 PVA 纤维与基体间的黏结作用较日本产 PVA 纤维强. 当国产 PVA 纤维体积分数小于 0.8% 时, 复合材料的余能随国产 PVA 纤维体积分数的增加而降低, 截面的桥接关系主要由日本产 PVA 纤维控制; 但当国产 PVA 纤维体积分数大于 0.8% 后, 材料余能趋于稳定, 维持在较低水平, 截面的桥接关系主要由国产 PVA 纤维控制.

不同纤维掺入方案对应的准应变硬化性能参数

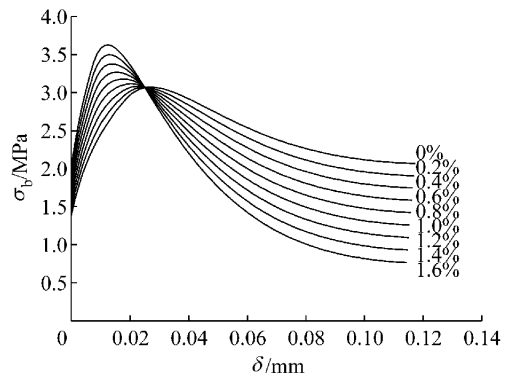
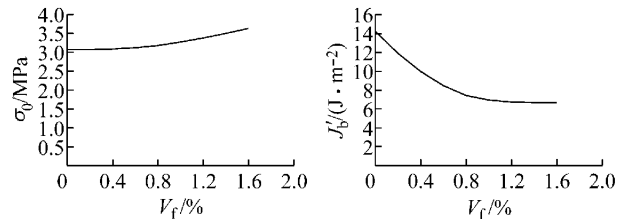


图2 国产纤维体积分数对桥接应力与裂缝开口宽度关系的影响

Fig.2 Effect of volume ratio of fiber on relationship between fiber bridging stress and crack opening width



a 对峰值桥接应力的影响

b 对材料余能的影响

图3 国产纤维体积分数对峰值桥接应力和材料余能的影响

Fig.3 Effect of volume ratio of fiber on bridging peak stress and complementary energy

如表 2 所示. 在保持纤维总体积分数 1.6% 不变的情况下, 掺入体积分数为 0.6% 的国产 PVA 纤维代替日本产 PVA 纤维, 截面的峰值桥接应力略有增加而材料余能有一定的降低, 但仍基本满足准应变硬化模型性能参数中有关能量准则要求; 如果仅掺入体积分数为 1.0% 的日本产 PVA 纤维, 虽基本满足能量准则的要求, 但由于纤维掺量降低过大, 截面的峰值桥接应力过低, 不满足准应变硬化模型中有关强度准则的要求. 由此可见, 用国产 PVA 纤维代替部分日本产 PVA 纤维会降低复合材料的余能, 但峰值桥接应力有所增加. 对于目前的国产 PVA 纤维, 考虑到纤维分散性的要求, 建议其体积分数为 0.6%, 与体积分数为 1.0% 的日本产 PVA 纤维混合使用, 这样既能基本满足能量准则的要求又能满足强度准则的要求, 从而能够使配制的 ECC 在弯曲作用和拉伸作用下发生较为饱和的多缝开裂.

1.2 混杂 PVA-ECC 配合比试验

在国产 PVA-ECC 配合比试验^[3]的基础上, 本文设计 5 组配合比对比研究混杂 PVA-ECC 的力学性能. 为了使配制的复合材料具有较高的抗压强度,

表 2 不同纤维掺入方案的准应变硬化性能参数

Tab.2 Parameters of pseudo strain hardening model with different PVA fibers

纤维掺入体积分数	σ_0/MPa	$J'_b/(J \cdot m^{-2})$	J'_b/J_{tip}	σ_0/σ_{fc}
1.6%日本产	3.11	14.22	4.74	1.04
1.0%日本产+0.6%国产	3.20	8.48	2.83	1.07
1.0%日本产	1.94	8.88	2.96	0.65

注:本配比中水胶比、粉煤灰掺量均较大^[11],假定基体的尖端韧度 J_{tip} 为 $3 J \cdot m^{-2}$ 、基体的初开裂强度 σ_{fc} 为 3MPa。

基准水胶比设计为 0.28;粉煤灰掺量设计为 2.4,以改善纤维与基体界面属性并降低成本;砂胶比(砂子与水泥用量质量比)为 0.36。经过对所设计的配合比进行试配,确定纤维的总体积分数为 1.6%,其中国产 PVA 纤维体积分数为 0.6%。试件配合比如表 3 所示。M21 中纤维的使用方案与目前配制 ECC 的常用配比相近。各配合比中减水剂用量根据新拌材料的工作性能和纤维的分散性进行试配确定。

表 3 PVA-ECC 材料的配合比

Tab.3 Mix proportion of PVA-ECC

试件 编号	质量/kg		砂胶比	水胶比	$V_f/\%$		减水剂/ kg
	水泥	粉煤灰			国产	日本产	
M17	1.0	2.4	0.36	0.28	0.6	1.0	0.002 9
M18	1.0	2.4	0.36	0.26	0.6	1.0	0.003 2
M19	1.0	2.4	0.36	0.28	0	1.0	0.002 0
M20	1.0	2.4	0.36	0.28	0	1.6	0.002 5
M21	1.0	2.4	0.36	0.28	0	2.0	0.002 8

2 混杂 PVA-ECC 弯曲性能试验

为近似反映实际工程中大体积制备 ECC 的工艺,配制混杂 PVA-ECC 时采用 40 L 的卧式搅拌机,每组配合比浇筑 3 个有效板状试件($15 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$),24 h 后拆模,然后放入标准养护室进行养护。28 d 将试件取出擦干,并用砂纸对与支座和加载点接触的表面进行打磨,以除去表面浮浆,使表面平整。采用深圳新三思公司制造的液压伺服微机控制材料试验机对试件进行四点弯曲薄板试验,四点弯试验加载装置如图 4 所示。试验时采用位移加载,控制加载速度为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,待试验出现主裂缝后停止加载。

本次试验中所有试件均表现出明显的多缝开裂现象,当试件出现第 1 条裂缝时,荷载出现卸载,但由于纤维的桥接作用,荷载会继续上升,将荷载传递给未开裂的基体,随后试件进入裂缝发展期,每新出现一条裂缝,荷载就会有所下降,然后再上升,在此期间,荷载缓慢增长但并未达到极限值,直到裂缝开

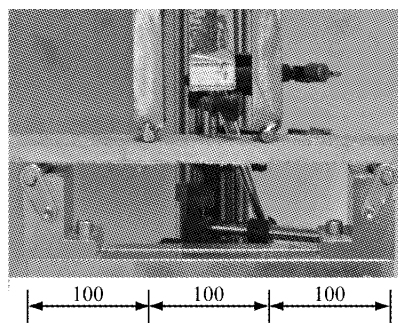


图 4 四点弯试验示意(单位:mm)

Fig.4 Loading device of four-point bending test (Unit: mm)

展达到饱和不再产生新裂缝,此后每条裂缝开始不断张开,直到某条最薄弱的裂缝即主裂缝开始不稳定发展,裂缝间纤维被不断拔出和拔断,试件随后破坏。各配合比在四点弯曲荷载作用下的荷载-位移曲线如图 5 所示。只掺体积分数为 1.0%日本产 PVA 纤维的 M19,其试件的弯曲变形能力最小,且裂缝产生时荷载下降的幅度最大,曲线“抖动”比较大,这与试验过程中观察到的裂缝宽度较大相一致。对于采用混杂 PVA 纤维的 M17 和 M18,由于后者的水胶比较小,其前期的变形硬化作用更加明显,表现为荷载-位移曲线的前半段更加“陡峭”,而后期由于国产 PVA 纤维更易于被拉断,材料的硬化作用减弱。M20 采用体积分数为 1.6%的日本产 PVA 纤维,与采用混合纤维的 M17 掺量相同,但由于日本产 PVA 纤维界面黏结低而抗拉强度高,前者的弯曲变形能力和弯曲强度均略有提高。M21 采用体积分数为 2.0%的日本产 PVA 纤维,其弯曲变形能力和弯曲强度显著提高,和采用相同类型、相同体积分数纤维试件的研究结果相近^[13]。将各配合比试件的极限跨中挠度和弯曲强度求平均值后列于表 4,同时根据反分析方法^[14]通过极限跨中挠度求得各配合比的极限拉应变也一并列于表 4。

从表 4 可以看出,M19 试件的极限跨中挠度最小,补充掺入一定量国产 PVA 纤维后的 M17,其试件的极限跨中挠度较 M19 提高了 51%,对应的极限拉应变达 2.37%;同时与全部采用日本产 PVA 纤维的 M20 相比,在纤维体积分数和水胶比均相同的情况下,M17 的极限跨中挠度相当于前者的 86%。由此可见,在日本产 PVA 纤维中掺入适量的国产 PVA 纤维能够有效增加所配制复合材料的弯曲变形能力和拉伸延性。

M17 和 M18 均采用混杂 PVA 纤维掺入方案,将其试件的极限跨中挠度进行对比可以发现,降低

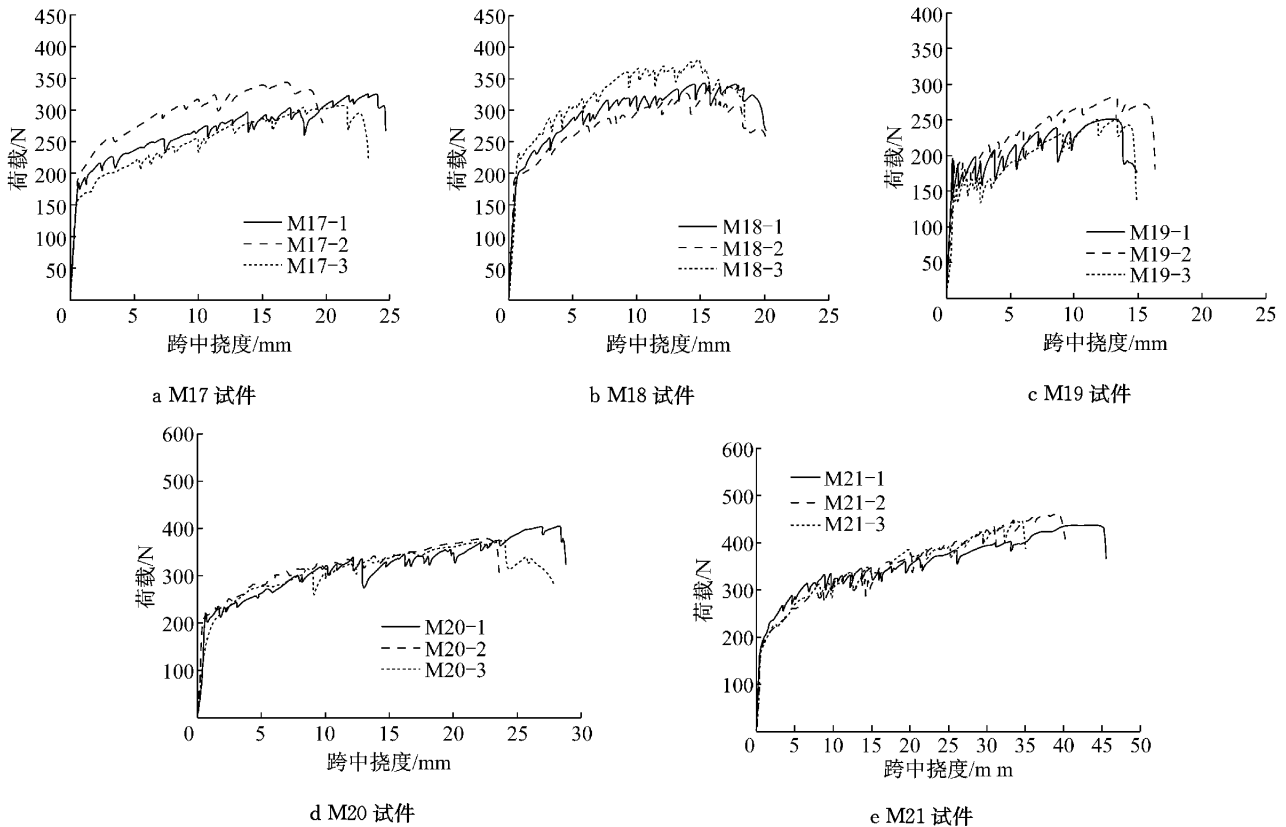


图 5 各试件荷载-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curve of each Specimen

表 4 各试件弯曲性能对比

Tab.4 Comparisons of flexural behavior of each specimen

试件	极限跨中挠度/mm	弯曲强度/MPa	极限拉伸应变/%
M17	22.22	8.56	2.37
M18	18.81	9.26	2.01
M19	14.68	6.92	1.57
M20	25.92	10.24	2.76
M21	40.03	11.96	4.25

水胶比后,国产 PVA 纤维与基体间界面的黏结作用增强,在脱黏的过程中更容易被拔断,裂缝截面更早地进入应变软化阶段,因而其弯曲变形能力有所降低。

根据试验过程中的峰值荷载可以求出各试件的弯曲强度.对比 M17 和 M19,掺入国产 PVA 纤维后截面的弯曲强度增加了近 25%,可见掺入的国产 PVA 纤维增强了裂缝截面的桥接作用.但 M17 与 M20 相比,前者的截面弯曲强度只有后者的 85%左右,这与上述理论分析有一定的差异,主要原因有两点:一是在纤维体积分数相同的情况下混合国产 PVA 纤维,纤维在基体中的分散性变差,影响了纤维桥接作用的发挥;二是理论分析模型适用于单轴受拉应力状态,而在弯矩荷载作用下,开裂截面处纤维所受的拉应力在外边缘最大,因而最早被拔出或

拉断而失效。

3 混杂 PVA-ECC 单轴拉伸试验

直接拉伸试验是反映 ECC 多缝开裂和应变硬化性能的基础试验,但其对试验装置有着较高的要求,且试件对中程度对直接拉伸试验结果影响较大,对中不理想的试件应力-应变曲线上找不到明显的初裂点,同时其线弹性阶段也较短,因而直接拉伸试验应用受到一定的限制.本文仅对弯曲变形能力较强的 M17 和 M21 进行单轴拉伸试验,以验证四点弯曲薄板试验得出的相关结论.采用哑铃型试件,试件厚度为 30 mm,中间变形测量区域长 80 mm,试件总长 250 mm,和四点弯曲薄板试验矩形薄板状试件一起成型的哑铃型试件如图 6 所示。

每组配合比浇筑 3 个有效哑铃型试件,24 h 后拆模,然后放入标准养护室进行养护.28 d 后采用深圳新三思公司制造的 30 kN 液压伺服微机控制材料试验机对试件进行单轴拉伸试验.取哑铃型试件中间 80mm 的区域为变形测量区段,在前后用 2 个量程为 12 mm 的位移传感器(linear variable differential transducers, LVDT)测量其变形。

直接拉伸试验的拉应力-应变全曲线如图 7 所示. 对比弯曲性能试验的荷载-位移曲线, 直拉试验试件的破坏过程类似于板的破坏过程, 均经历了弹性阶段、多条裂缝发展阶段和破坏阶段. 对于采用混合纤维的 M17, 其前期硬化作用较为明显, 后期随着

国产 PVA 纤维的拉断逐渐失去硬化趋势; 对于全部采用日本产 PVA 纤维的 M21, 其前期硬化作用并不明显, 曲线基本呈水平, 而在后期随着变形的增大, 纤维的滑移硬化效应逐渐发挥, 应变硬化现象趋于明显.

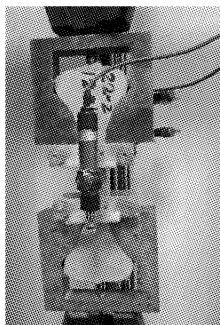
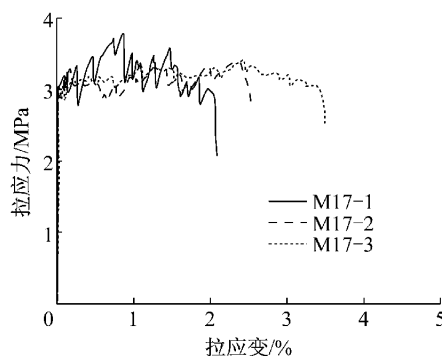
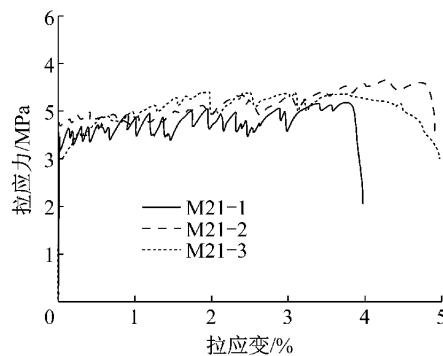


图 6 单轴拉伸试验装置

Fig.6 Loading device of uniaxial tensile test



a M17 试件



b M21 试件

图 7 ECC 单轴拉伸试验应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curve of uniaxial tensile test on ECC

将直接拉伸试验结果求平均后列于表 5, 采用混杂纤维的 M17, 其初裂应力和峰值应力均低于全部采用日本产 PVA 纤维的 M21, 这主要是由于后者纤维掺量较高, 且日本产 PVA 纤维分散性较国产纤维略好, 试件中气泡等缺陷较小. 峰值应力与初裂应力之比反映应变硬化程度, M17 为 1.16, 低于 M21 的 1.28, 这是由于出现主裂缝截面处全部采用日本产纤维较采用混杂纤维时滑移硬化更加集中. 将四点弯曲薄板试验经过反分析方法^[14]得到的极限拉应变与直接拉伸试验的结果进行对比, 两者的吻合度较好, M17 和 M21 的应变误差分别为 9.2% 和 5.0%, 证明用反分析方法求复合材料极限拉应变的可行性.

表 5 单轴拉伸试验结果

Tab.5 Results of uniaxial tensile test

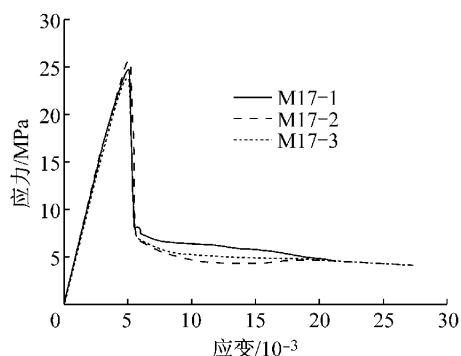
试件	初裂应变/%	初裂应力/MPa	极限应变/%	峰值应力/MPa	应变误差/%
M17	0.022	3.02	2.61	3.51	9.2
M21	0.023	3.44	4.46	4.39	5.0

4 混杂 PVA-ECC 单轴压缩试验

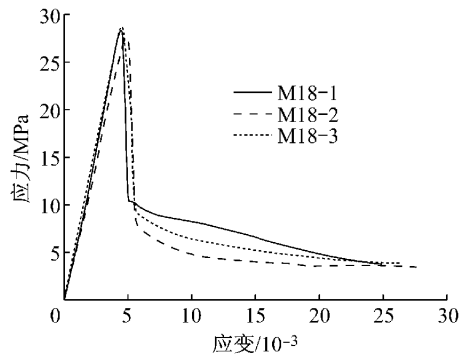
在制备混杂 PVA-ECC 受拉试件和受弯试件的同时, 制作 2 组同一批次下的棱柱体试件 (长、宽、高分别为 100 mm, 100 mm, 300 mm). 每组制作 6 个试件, 3 个用于测量混杂 PVA-ECC 的轴心抗压强度, 3 个用于测量混杂 PVA-ECC 的弹性模量. 各试件在标准养护室养护 28 d 后进行相应试验.

4.1 轴心抗压强度

根据荷载-变形曲线得到混杂 PVA-ECC 试件轴心受压时的应力-应变全曲线如图 8 所示. 试件加载到达峰值荷载时会产生一条较大的裂缝并伴有一声闷响, 由于纤维在裂缝间的桥接作用, 试件并没有



a M17 试件



b M18 试件

图 8 混杂 PVA-ECC 单轴受压应力-应变全曲线

Fig.8 Stress-strain curve of uniaxial compressive test on hybrid PVA-ECC

出现剥落现象,试件整体性完好,荷载缓慢下降,以至于在压应变达到 2% 时试件仍能承担一定的荷载。

对各配合比轴心受压应力-应变全曲线的峰值应变 ϵ_c 、峰值应力 σ_c 和残余强度 σ_r 求平均值,所得结果列于表 6,其中残余强度指水平段上应变为 $5\epsilon_c$ 时对应的压应力。从表 6 中可以看出,M17 轴心受压的峰值应力 σ_c 可以达到 25 MPa 左右,而其峰值应变 ϵ_c 达 0.005,显著高于相同等级的普通混凝土,说明纤维的掺入增大了复合材料的受压变形能力,提高了其受压韧性^[15]。另外其残余强度比为 0.17,低于立方体抗压强度试验时的 0.5,这主要是由于试件的高宽比变大,套箍作用减小,试件的竖向裂缝开展基本不受加载装置约束的缘故。M18 的水胶比相对较小,因而其轴心抗压强度相对较高,平均可达 28.3 MPa,但是其峰值应变和残余强度均略有降低,这说明与普通混凝土一样,降低水胶比会提高材料的抗压强度但会增大材料的受压脆性。

表 6 单轴抗压试验结果

Tab.6 Results of uniaxial compressive test

试件编号	$\epsilon_c/10^{-3}$	σ_c/MPa	σ_r/MPa	残余强度比
M17	5.063	24.8	4.31	0.17
M18	4.644	28.3	3.98	0.14

4.2 弹性模量

混杂 PVA-ECC 弹性模量的测量方法参考《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[16]。各配合比的弹性模量如表 7 所示。混杂 PVA-ECC 由于没有使用粗骨料,其弹性模量较相应强度等级普通混凝土低,约为后者的 60%,M17 因水胶比较大,其弹性模量较 M18 还要略低。

表 7 混杂 PVA-ECC 弹性模量

Tab.7 Elasticity modulus of hybrid PVA-ECC

试件编号	弹性模量/MPa	平均值/MPa
M17	1.747×10^4	1.76×10^4
	1.721×10^4	
	1.810×10^4	
M18	1.835×10^4	1.88×10^4
	1.903×10^4	
	1.912×10^4	

5 ECC 材料性能成本分析

结合目前制备 ECC 相关材料的成本,将典型配合比 ECC 的制作成本和拉伸性能列于表 8,其中 M0 代表普通混凝土,取其每立方米的成本为单位 1 进行比较。M7 试件^[3]中的水泥与粉煤灰质量比为 1.0:1.8,砂胶比为 0.36,水胶比为 0.32,PVA 纤维

体积分数为 1.3%,PVA 纤维全部采用国产。对比 M0 和 M7 可知,使用国产 PVA 配制的 ECC,材料成本增加不多,但性能提高较为显著;对比 M17 和 M19 可知,使用国产 PVA 和日本产 PVA 配制的混杂 PVA-ECC,成本基本没有增加,而拉伸性能提高了 50%,相反从 M20 可以看出,如果全部使用日本产 PVA 纤维,提高至相同的性能水平所需的成本增加要多得多;M21 超过了配制 ECC 的临界 PVA 纤维体积分数,因而具有最为优异的拉伸性能。

表 8 各配合比成本与性能对比

Tab.8 Cost and performance comparisons of each mix

试件编号	PVA 掺入体积分数		制作成本	极限拉伸应变
	国产	日本产		
M0	0	0	1.0	0.01%
M7	1.3%	0	2.0	0.50%
M17	0.6%	1.0%	6.5	2.37%
M19	0	1.0%	6.0	1.57%
M20	0	1.6%	9.5	2.76%
M21	0	2.0%	11.5	4.25%

根据 ECC 材料成本及拉伸性能,可将上述配合比分为三类:以 M7 为代表的低成本、较低拉伸性能的配合比,以 M17 为代表的中等成本、较高拉伸性能配合比和以 M21 为代表的高成本、高拉伸性能的配合比。采用混杂 PVA 纤维掺入方案的 M17,其拉伸性能较普通混凝土有显著的改善,拉伸延性较好,而成本只有 M21 的一半左右,满足大多数实际工程的应用需求。

6 结论

开展了混杂 PVA-ECC 力学性能的研究,对混杂 PVA-ECC 的配合比进行优化设计,在适当增加成本的情况下,进一步提高了水泥基复合材料的性能,为工程结构性能提升提供更多的材料选择。

(1) 根据配制 ECC 的准应变硬化模型及其性能参数,通过理论分析发现,掺入国产 PVA 代替部分日本产 PVA 纤维,会降低复合材料的余能,但能维持截面最大桥接应力,可实现材料多缝开裂;结合 PVA 纤维分散性的要求,确定了混杂 PVA-ECC 中日本产 PVA 纤维和国产 PVA 纤维的体积分数,设计了 5 组配合比研究其力学性能。

(2) 四点弯曲薄板试验表明,混杂 PVA-ECC 试件裂缝开展较为饱和,具有较强的弯曲变形能力,通过反分析方法计算的极限拉应变可达 2.37%;与只掺入日本产 PVA 纤维的配合比对比,证明掺入的国

产 PVA 纤维对复合材料的弯曲变形能力有较大的提高。

(3) 对采用混杂 PVA 纤维的 M17 和采用体积分数为 2.0% 的日本产 PVA 纤维的 M21 进行直接拉伸试验,两者在直接拉伸作用下均能发生较为充分的多缝开裂,测量的极限拉应变与反分析方法的结果较为相符。

(4) 对混杂 PVA-ECC 进行单轴压缩试验,测得其轴心抗压强度为 25MPa 左右,静力受压弹性模量约为 1.8×10^4 MPa,相对较低,而其峰值应变是相应等级普通混凝土的 2~3 倍,说明 ECC 在极大提高材料的拉伸延性时也显著提高了其受压韧性。

(5) 最后对制得的典型配合比进行性能成本对比分析,提出了低成本、较低拉伸性能的配合比 M7,中等成本、较高拉伸性能的配合比 M17 和高成本、高拉伸性能的配合比 M21 三个具有代表性的配合比,供实际工程根据结构性能的需要进行选择。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kanda T, Li V C. Interface property and apparent strength of high-strength hydrophilic fiber in cement matrix [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1998, 10(1): 5.
- [3] 汪卫. ECC 配合比优化设计及其框架节点抗震性能研究[D]. 南京:东南大学, 2013.
WANG Wei. Research on optimization design of ECC and seismic behavior of ECC beam-column joints[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [4] Ahmed S, Maalej M, Paramasivam P. Analytical model for tensile strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid fiber-engineered cementitious composites [J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 2007, 19(7): 527.
- [5] 罗百福. 绿色高韧性纤维增强水泥基复合材料的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
LUO Baifu. Study on green high-toughness fiber reinforced cementitious composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [6] 邓宗才, 薛会青. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的收缩变形[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(2): 210.
- [7] Li V C, Wu H C. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(8): 390.
- [8] Li V C. From micromechanics to structural engineering —The design of cementitious composites for civil engineering applications [J]. *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, 1993, 10(2): 37.
- [9] Marshall D B, Cox B N. A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites [J]. *Mechanics of Material*, 1988(7): 127.
- [10] Kanda T, Li V C. Multiple cracking sequence and saturation in fiber reinforced cementitious composite[J]. *Concrete Research and Technology*, JCI, 1998, 9(2): 19.
- [11] Yang E H, Yang Y Z, Li V C. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness[J]. *Material Journal*, ACI, 2007, 99(9): 303.
- [12] Li V C, Wu C. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. *Material Journal*, ACI, 2002, 104(6): 463.
- [13] Lin Z, Kanda T, Li V C. On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites [J]. *Concrete Science and Engineering*, RILEM, 1999, 1(1): 173.
- [14] 蔡向荣, 徐世烺. UHTCC 薄板弯曲荷载-变形硬化曲线与单轴拉伸应力-应变硬化曲线对应关系研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 8.
CAI Xiangrong, XU Shilang. Study on corresponding relationships between flexural load-deformation hardening curves and tensile stress-strain hardening curves of UHTCC [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 8.
- [15] 蔡向荣, 徐世烺. UHTCC 单轴受压韧性的试验测定与评价指标[J]. *工程力学*, 2010, 27(5): 218.
CAI Xiangrong, XU Shilang. Experimental measurement and evaluation indexes of toughness properties for UHTCC under uniaxial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5): 218.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.