



# 混杂 PVA-ECC 配合比优化设计及力学性能 试验研究

乔 治<sup>1</sup>, 潘钻峰<sup>2</sup>, 孟少平<sup>1</sup>, 张德锋<sup>3</sup>, 刘籍蔚<sup>1</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 南京 210096; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;

3. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 为了降低工程用水泥基复合材料(ECC, Engineered Cementitious Composites)制造成本, 使 ECC 能够在实际工程中大规模应用, 将中国产 PVA 纤维和日本产 PVA 纤维以一定的比例混合, 配制混杂 PVA-ECC。基于 ECC 的材料设计理论, 兼顾抗压强度和受拉能力, 对掺有硅粉的混杂 PVA-ECC 中的纤维体积含量进行了优化设计。通过四点弯曲试验和轴心抗压试验, 研究了混杂 PVA-ECC 在不同龄期下的弯曲性能和抗压性能。试验结果表明, 混杂 PVA-ECC 试件均表现出明显的应变硬化和多缝开裂的特征, 此外, 其抗压强度后期增长明显。基于 UM 法, 提出一种改进的反分析方法, 可利用四点弯曲试验结果推导 ECC 的极限拉伸应变, 并与试验结果进行了比较, 结果表明, 通过建议的反分析方法得到的预测值与试验值吻合较好。

**关键词:** 水泥基复合材料; 聚乙烯醇纤维; 混杂; 配合比; 抗压强度; 受拉极限应变; 反分析方法

**中图分类号:** TU528.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)05-0072-10

## Optimization of mix proportion and experimental analysis of mechanical properties of hybrid PVA-ECC

Qiao Zhi<sup>1</sup>, Pan Zuanfeng<sup>2</sup>, Meng Shaoping<sup>1</sup>, Zhang Defeng<sup>3</sup>, Liu Jiwei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 3. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, P. R. China)

**Abstract:** In order to reduce the production cost of Engineered Cementitious Composites (ECC), it is very necessary to substitute part of the expensive Japanese PVA fibers with the homemade PVA fibers for the ease of extensive application of the practical structures. Based on the ECC design theory, an optimal design for the fiber volume content of hybrid PVA-ECC is analyzed, taking both compressive strength and tensile strain capacity into account. The mechanical behavior of hybrid PVA-ECC is obtained through the four-point bending test and uniaxial compressive test. Experimental results indicate that the strain hardening and multiple cracking behavior of hybrid PVA-ECC are observed in the test, and the long-term

**收稿日期:** 2015-03-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(51208093, 5141101015); 教育部博士点基金项目(20120092120021)

**作者简介:** 乔治(1989-), 男, 博士生, 主要从事工程用水泥基复合材料(ECC)研究, (Email)qiaozh1989@163.com.

**Received:** 2015-03-16

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51208093, 5141101015); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20120092120021)

**Author brief:** Qiao Zhi (1989-), PhD candidate, main research interest: engineered cementitious composites (ECC), (E-mail)qiaozh1989@163.com.

compressive strength is distinctly increased. Furthermore, a modified inverse method based on the UM method is proposed, to use the measured data of four-point bending test to calculate the tensile strain capacity of ECC, and the proposed method is verified with the experimental results of hybrid PVA-ECC specimens.

**Key words:** cementitious composites; polyvinyl alcohol fiber; hybrid; mix proportion; compressive strength; tensile strain capacity; inverse method

混凝土材料存在抗拉强度低、韧性差、开裂后裂缝宽度难以控制等缺点,使处于恶劣环境或高烈度区的混凝土结构面临严峻的耐久性和安全性问题。工程用水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)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,是由密歇根大学的 Li 等<sup>[1-2]</sup>在 20 世纪 90 年代,根据细观力学和断裂力学基本原理设计的一种短纤维增强水泥基复合材料。ECC 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,用纤维作增强材料,在纤维体积掺量不大于 2% 的情况下,直接拉伸试验得到的极限拉应变通常可达 2% 以上,且拉伸过程中形成许多宽度小于 100  $\mu\text{m}$  的细裂缝,这种多缝开裂导致了拉伸应变硬化行为。

聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)纤维亲水、无毒、环保,目前,对 ECC 的研究主要集中在 PVA-ECC。PVA 纤维主要产自日本可乐丽公司,成本较高。中国 PVA 纤维的质量和生规模均已达到国际先进水平,难以配制 ECC 的主要原因是 PVA 纤维直径偏小,表面没有进行涂油处理,纤维分散性较差,纤维与水泥基体的粘结作用较强,在拔出过程中容易拉断,因而,不易满足准应变硬化条件。本课题组汪卫等<sup>[3]</sup>根据 ECC 的材料设计理论,对采用中国产 PVA 纤维配置 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,优化配合比后的中国产 PVA-ECC 的极限拉应变仅达 0.5%。为进一步改善复合材料的拉伸延性,兼顾应用成本,将中国产 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,对混杂 PVA-ECC 力学性能的研究较少。Ahmed 等<sup>[4]</sup>提出了混杂纤维 ECC 的材料设计理论模型,并通过单轴拉伸试验验证了该模型可较为准确地计算开裂强度和纤维桥接应力。罗百福<sup>[5]</sup>尝试利用碳纤维与 PVA 纤维混杂改善 ECC 材料的韧性和延性,在纤维总体积含量 2% 不变的情况下,用 25% 的碳纤维代替 PVA,混杂 ECC 的弯曲韧性和

延性均有所下降,强度变化不明显。王海超等<sup>[6]</sup>通过抗折试验发现,用适当比例的国产 PVA 纤维代替进口 PVA 纤维可以达到相同的抗弯强度。本课题组潘钻峰等<sup>[7]</sup>尝试用中国产 PVA 纤维替代日本产 PVA 纤维,研究了多组混杂 ECC 的力学性能,通过对比对各组混杂 ECC 的力学性能与成本,给出一组较为合理的配合比,其中,日本产纤维和中国产纤维体积含量分别为 1% 和 0.6%,其极限拉伸应变达到 2.4%,轴心抗压强度为 24.8 MPa。

直接拉伸试验是评价 ECC 力学性能最直观、最有效的试验方法,但直接拉伸试验对试验设备要求较高,操作复杂,在试验过程中易出现偏心受拉的情况,影响测试结果。相对而言,四点弯曲试验操作简单,同时,试件纯弯段能够反映 ECC 的多缝开裂和应变硬化行为,因此,可采用反分析方法<sup>[8-10]</sup>,通过四点弯曲试验结果推导 ECC 的拉伸性能。

本文在已开展的混杂 PVA-ECC 配合比试验基础上,通过 ECC 材料设计理论,兼顾成本和拉伸性能,进一步优化混杂 ECC 的配合比,适当提高混杂 PVA-ECC 的抗压强度,使得混杂 PVA-ECC 更加易于推广应用。通过四点弯曲和单轴压缩试验,研究混杂 PVA-ECC 的基本力学性能,同时,基于 Qian 等<sup>[8]</sup>提出的反分析方法(UM 法),利用实测 ECC 的抗压性能,提出一种改进的反分析方法计算 ECC 的极限拉伸应变,并与试验结果进行了比较。

## 1 混杂 PVA-ECC 配合比优化设计

### 1.1 ECC 材料设计理论

纤维增强水泥基复合材料若要产生多条细密裂缝需满足稳态开裂准则<sup>[1,11-12]</sup>,即裂缝尖端断裂韧度  $J_{\text{tip}}$  不能超过材料的余能  $J'_b$ 。

$$J_{\text{tip}} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta = J'_b \quad (1)$$

$$J_{\text{tip}} = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2)$$

式中： $\sigma_0$ 、 $\delta_0$ 分别表示最大的纤维桥接应力及其对应的裂缝开口宽度； $K_m$ 和  $E_m$ 分别是基体断裂韧度和弹性模量。

式(1)描述了一个扁平裂缝稳态发展中能量交换的过程，即外力功转化为裂缝尖端不断扩展所需的能和裂缝间纤维与基体脱粘或滑移所吸收的能量。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  $J'_b$ 。

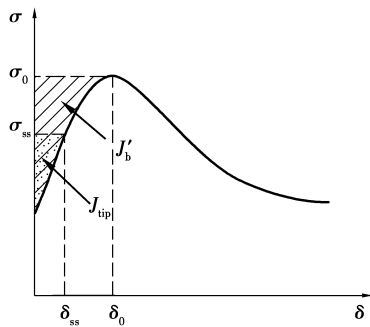


图 1 典型的纤维桥接应力-裂缝开口宽度曲线

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

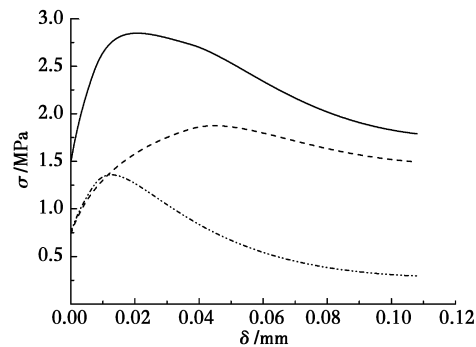
纤维增强脆性基体材料出现准应变硬化行为的另一准则是基体的开裂强度  $\sigma_c$  不能超过最大的纤维桥接应力  $\sigma_0$  [1]

$$\sigma_c < \sigma_0 \quad (3)$$

式中： $\sigma_c$ 的大小与基体断裂韧度  $K_m$ 和材料初始缺陷有关。ECC 需同时满足能量准则和强度准则，才能展现拉伸准应变硬化和多条细密裂缝的性能，即性能指标  $J'_b/J_{tip}$ 和  $\sigma_0/\sigma_c$ 必须同时大于 1。考虑到水泥基体与纤维属性的离散性， $J'_b/J_{tip}$ 和  $\sigma_0/\sigma_c$ 需要预留一定的富余度，富余度越大，材料越易出现稳定的饱和和多缝开裂现象。Wu [13] 建议  $J'_b/J_{tip}$ 和  $\sigma_0/\sigma_c$ 应分别大于 3.0 和 1.45。

## 1.2 混杂 PVA-ECC 纤维体积分量的优化设计

纤维桥接应力-裂缝开口宽度关系  $\sigma-\delta$  是 ECC 材料设计理论中一个重要的纤维桥接性能本构关系。Lin 等 [14] 给出了一个考虑纤维/基体界面特性以及纤维断裂和纤维强度折减的微观力学模型，并将  $\sigma-\delta$  曲线表示为一组与微观力学参数相关的表达式，模型中考虑的参数主要包括化学粘结  $G_d$ 、摩擦粘结  $\tau_0$ 、滑移硬化系数  $\beta$ 、强度增强系数  $f$  和强度折减系数  $f'$ ，此外，还包括基体弹性模量  $E_m$ 、基体开裂强度  $\sigma_c$ 、纤维体积分量  $V_f$ 、纤维直径  $d_f$ 、纤维长度  $L_f$  和纤维弹性模量  $E_f$  以及纤维实际强度  $\sigma_{fu}$ 。在计算混杂 PVA-ECC 的  $\sigma-\delta$  曲线时，Ahmed 等 [4] 建议分别计算不同种类纤维的  $\sigma-\delta$  曲线，应用叠加原理可得到混杂 PVA-ECC 的  $\sigma-\delta$  曲线，如图 2 所示。表 1 给出了计算所需要的微观力学参数，其中，强度折减系数  $f'$  由 Kanda 等 [15] 通过纤维原位单丝拔出试验实测所得；参考 Wu [13] 的试验结果，日产 PVA 纤维与中国产纤维的强度增强系数  $f$  分别取 0.3 和 0.5；PVA 纤维的界面性能参数  $G_d$ 、 $\tau_0$  和  $\beta$  的取值参考文献 [16-17]。



注：----1.0%日本产PVA    - - - - 0.6%中国产PVA  
——1.0%日本产+0.6%中国产

图 2 不同纤维组成 ECC 的纤维桥接应力-裂缝开口宽度曲线

Fig. 2  $\sigma-\delta$  curves for different type of PVA-ECC

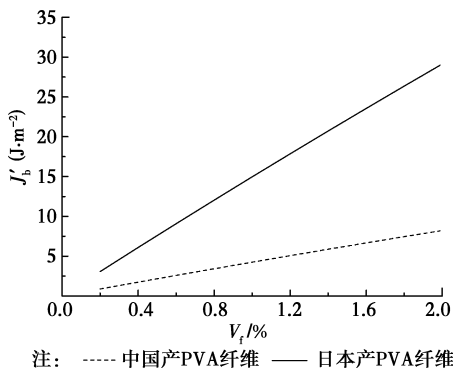
表 1 PVA-ECC 纤维桥接模型微观力学性能参数

Table 1 Parameters of micromechanical properties in fiber bridging mode

纤维类型	纤维物理和力学性能参数				纤维/基体界面性能参数					基体力学性能参数		
	$d_f/\mu\text{m}$	$l_f/\text{mm}$	$E_f/\text{GPa}$	$\sigma_{fu}/\text{MPa}$	$f$	$f'$	$\tau_0/\text{MPa}$	$G_d/\text{N}\cdot\text{m}$	$\beta$	$E_m/\text{GPa}$	$\sigma_c/\text{MPa}$	$J_{tip}/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$
日本产	39	12	42.8	1 092	0.3	0.3	1	1.5	0.2	20 000	2.5	3
中国产	26	12	36.3	1 052	0.5	0.3	1.5	2.5	0.5	20 000	2.5	3

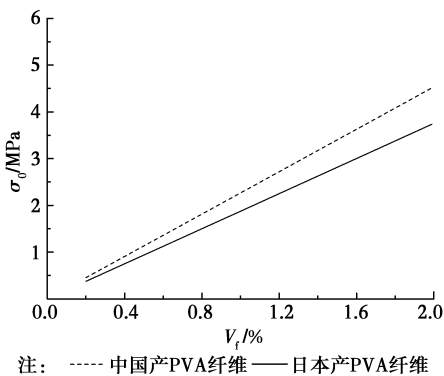
注：本配合比中水胶比、粉煤灰掺量均较大 [17]，假定基体尖端韧度  $J_{tip}$  为  $3 \text{ J/m}^2$ ，基体的开裂强度为  $2.5 \text{ MPa}$ 。

图 3 和图 4 分别表示 ECC 中纯中国产和纯日产纤维的体积含量由 0.2% 到 2.0% 变化时,复合材料余能和截面峰值桥接应力与纤维体积掺量的关系。图 3 和图 4 表明,PVA-ECC 的  $J_b'$  和  $\sigma_0$  均随纤维含量的增加而增长,但日产 PVA-ECC 的  $J_b'$  的增长速度明显快于中国产 PVA-ECC,且相同纤维含量下,日本产 PVA-ECC 的  $J_b'$  也远大于中国产 PVA-ECC,中国产纤维  $V_f = 2\%$  时的  $J_b'$  仅与日本产纤维  $V_f = 0.6\%$  时相当。在相同纤维含量下,中国产 PVA-ECC 的  $\sigma_0$  略大于日本产 PVA-ECC。由此可见,日本产 PVA 纤维的作用主要体现在增加了复合材料的余能,而中国产 PVA 纤维的主要作用则是提高了截面峰值桥接应力。在纤维体积含量一定的情况下,将日本产纤维和中国产纤维混杂使用,由日本产纤维主要提供复合材料的余能,使得混杂 ECC 能够满足能量准则,而中国产纤维则可提高峰值桥接应力以满足强度准则的要求。



注: ---- 中国产PVA纤维 —— 日本产PVA纤维  
图 3 纤维掺量对材料余能的影响

Fig. 3 Effect of fiber content on complementary energy



注: ---- 中国产PVA纤维 —— 日本产PVA纤维  
图 4 纤维掺量对峰值桥接应力的影响

Fig. 4 Effect of fiber content on fiber-bridging peak stress

混杂 PVA-ECC 中总纤维体积含量分别为 1.4%、1.6%、1.8% 与 2.0% 时,复合材料的  $J_b'$  与中国产 PVA 纤维体积掺量的关系如图 5 所示。图

5 表明复合材料  $J_b'$  随中国产 PVA 纤维体积掺量的增加而降低,当中国产 PVA 纤维体积掺量大于一定值时, $J_b'$  趋于稳定。本文选取了 5 组典型的纤维掺入方案,计算性能指标  $J_b'/J_{tip}$  和  $\sigma_0/\sigma_c$ ,见表 2。方案 4 中,中国产纤维含量偏少,导致峰值桥接应力不能满足强度准则;方案 5 中,日本产纤维含量偏少, $J_b'$  相较其他方案明显偏小;其余 3 种方案,日本产纤维掺量均为 1.0%,中国产纤维含量从 0.6% 增加到 1%,但  $J_b'$  和  $\sigma_0$  的增长幅度并不大,均满足能量准则和强度准则。考虑到中国产纤维直径偏小,纤维体积掺量相同时中国产纤维的数目较多,且纤维表面未经涂油处理,纤维分散性较差。ECC 预搅拌试验发现,当中国产纤维体积掺量超过 1.0% 时,搅拌过程中纤维易结团。兼顾 ECC 性能与制作成本,混杂 PVA-ECC 中纤维体积掺量取 1.0% 日本产 PVA 纤维加 0.6% 中国产 PVA 纤维。

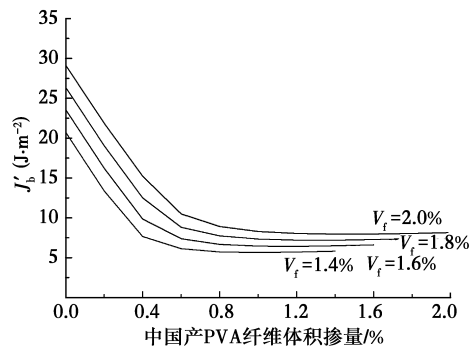


图 5 中国产 PVA 纤维掺量对复合材料余能的影响  
Fig. 5 Effect of domestic fiber content on complementary energy

表 2 不同纤维掺入方案的性能指标对比

Table 2 Comparison of indicators of different type of PVA-ECC

方案	纤维体积掺量/%		$\sigma_0$ /MPa	$J_b'$ ( $J \cdot m^{-2}$ )	$J_b'/J_{tip}$	$\sigma_0/\sigma_c$
	日本产	中国产				
1	1.0	1.0	3.71	8.29	2.76	1.48
2	1.0	0.8	3.27	7.74	2.58	1.31
3	1.0	0.6	2.85	7.37	2.46	1.14
4	1.0	0.4	2.45	7.66	2.55	0.98
5	0.8	0.6	2.53	6.12	2.04	1.01

### 1.3 混杂 PVA-ECC 的配合比设计

课题组已对混杂 PVA-ECC 的配合比优化开展了试验研究<sup>[7]</sup>,得到的典型配合比见表 3 中的 M17,四点弯曲和直接拉伸试验表明试件 M17 能够呈现

饱和多缝开裂现象,其极限拉伸应变达到 2.4%,但其轴心抗压强度较低,强度随时间增长较为缓慢,14 d 强度仅为 28 d 强度的 50% 左右。本文采用硅粉替代部分水泥,以提高混杂 PVA-ECC 的抗压强度。设计了 5 组配合比(表 3),研究水胶比、硅粉掺量、纤维体积掺量对混杂 PVA-ECC 力学性能的影响。水泥采用海螺牌 42.5 型普通硅酸盐水泥;粉煤

灰为南京华润热电厂生产的 I 级灰;硅粉为天恺材料公司生产的 900 加密微硅粉, $S_iO_2$  含量为 85%~87%;石英砂平均粒径 110  $\mu\text{m}$ ,最大粒径 300  $\mu\text{m}$ ;减水剂为聚羧酸类高效减水剂;中国产纤维为江苏博特新材料有限公司生产的 PVA,日本产纤维则采用日本可乐丽生产的 REC-15 型 PVA,两种纤维的物理和力学性能见表 1。

表 3 混杂 PVA-ECC 的试验配合比  
Table 3 Matrix mix proportion of PVA-ECC

配合比	水泥/kg	硅粉/kg	粉煤灰/kg	砂胶比/kg	水胶比/kg	纤维体积掺量/%		减水剂/kg
						日本产	中国产	
M17	1.0	0	2.4	0.36	0.28	1	0.6	0.002 9
H1	0.92	0.08	3.2	0.36	0.28	1	0.6	0.002 8
H2	0.92	0.08	3.2	0.36	0.26	1	0.6	0.003 5
H3	1.0	0	3.2	0.36	0.28	1	0.6	0.001 5
H4	0.92	0.08	3.2	0.36	0.28	1.6	0	0.002 0
H5	0.92	0.08	3.2	0.36	0.28	0	0	0.001 0

## 2 混杂 PVA-ECC 力学性能试验

ECC 试件均采用 40 L 的卧式搅拌机进行搅拌,首先,将水泥、硅粉、粉煤灰和石英砂干拌 2 min,然后,加入全部的水和减水剂,搅拌约 3 min,待浆体具有较高的流动性后,加入 PVA 纤维,继续搅拌 5 min 左右,此时,纤维在基体中分散基本均匀,开始浇筑试件,24 h 后拆模并放入标准养护室至试验龄期。

采用四点弯曲试验研究配合比 H1、H2 和 H4 在 28 d 龄期时的弯曲性能。另外,选取配合比 H1 研究了其弯曲性能随龄期(7、14、28 和 90 d)的变化规律。试件尺寸为 15 mm×50 mm×350 mm,每组配合比浇筑 4 个试件,试件采用钢模成型,标准养护至试验龄期后,用打磨机对支座和加载点接触的表面进行打磨,使其受力均匀。四点弯曲试验在 30 kN 的深圳新三思液压伺服微机控制材料试验机上进行,试验跨径为 300 mm,采用三分点加载,按位移控制加载,试验全过程保持控制加载速度为 0.5 mm/min,直至试件出现主裂缝后停止加载。

单轴压缩试验在 300 t 液压伺服微机控制材料试验机上进行,测试配合比 H1~H5 在 28 d 龄期时的受压性能,选取配合比 H1,研究其受压性能随龄期(7、14、28、90 和 300 d)的变化规律。试件尺寸为

100 mm×100 mm×300 mm,每组配合比浇筑 6 个试件,3 个用来测量 ECC 的轴心抗压强度,另外 3 个用于测量弹性模量。试件对中后先进行 3 次预压,预压应力为 5 MPa,随后进行正式加载,采用位移加载方式,加载速度为 0.3 mm/min。

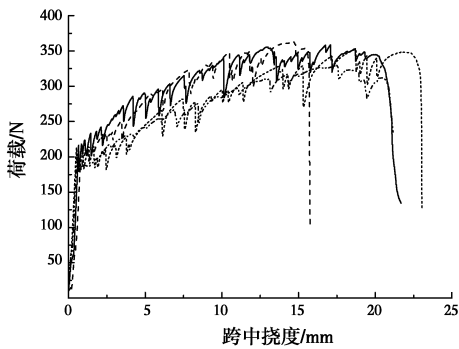
## 3 试验结果分析

### 3.1 四点弯曲试验结果

四点弯曲试验得到的不同配合比试件在 28 d 龄期时的荷载-位移曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,混杂 PVA-ECC 试件开裂后,荷载随着位移的增加而缓慢增大,3 组试件均呈现明显的应变硬化现象。荷载-位移曲线的平缓段随着位移的增加,荷载不断上下波动,每个波动代表一条新裂缝的产生,这同试验观测现象相吻合,每组试件都出现多缝开裂的现象。

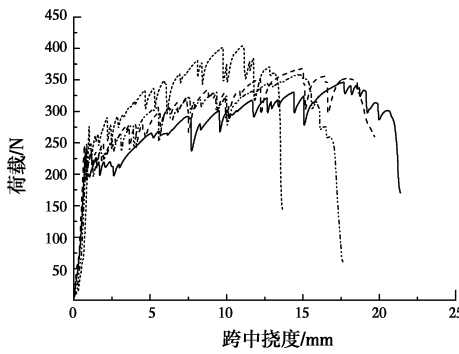
试件 H2 的开裂荷载平均值最大,这是由于 H2 水胶比较小,基体强度较大,开裂荷载大小主要与基体强度有关。H1 和 H2 掺入中国产纤维,纤维表面未经处理,与基体的粘结作用较强,导致纤维容易拉断,过早进入软化阶段,使得 H1 和 H2 的极限荷载和极限挠度均小于 H4。H2 由于水胶比的减少,基体与纤维间界面的粘结作用进一步增强,其极限挠度相较 H1 有所下降。

试件 H1 在 7、14、28 和 90 d 龄期时的荷载-位移曲线见图 7。由图 7 可知,随着龄期的增加,基体强度和基体与纤维之间的粘结作用不断增强,开裂强度与极限强度随龄期呈增长的趋势,在 14 d 内,增长幅度较大,14 d 之后趋于稳定。基体与纤维之间的粘结作用不断增强导致越来越多的纤维在受力过程中发生断裂破坏而不是拔出破坏,材料的变形能力随着龄期的增加而逐渐降低。28 d 试件的极限挠度较 7 d 的降低了 16.1%,而 90 d 试件的极限挠度只比 28 d 时降低了 12.7%。



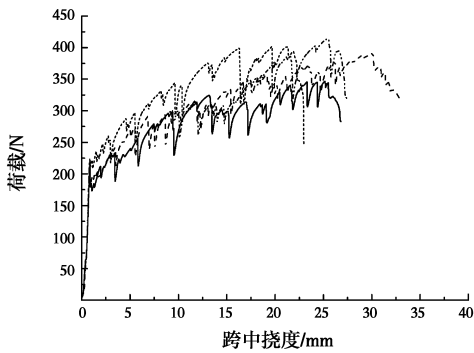
(a) H1的荷载-位移曲线

注: — H1-1 --- H1-2 ..... H1-3 ..... H1-4



(b) H2的荷载-位移曲线

注: — H2-1 --- H2-2 ..... H2-3 ..... H2-4



(c) H4的荷载-位移曲线

注: — H4-1 --- H4-2 ..... H4-3 ..... H4-4

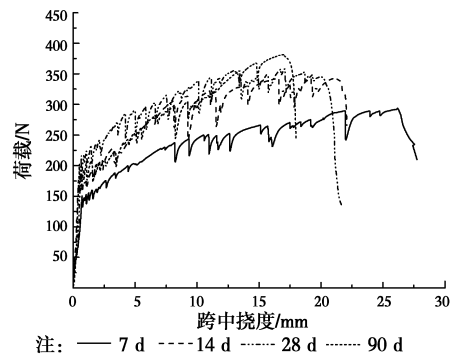
图 6 28 d 龄期时试件的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of Specimens at 28 days

### 3.2 单轴压缩试验结果

单轴压缩试验得到各配合比在 28 d 时的压应力-应变曲线如图 8 所示。由图 8 可知,混杂 PVA-ECC 的压应力-应变曲线形状与砂浆基体类似,但混杂 PVA-ECC 具有更好的变形能力,其峰值压应变可达 0.006 5,远大于砂浆基体的 0.002 5。砂浆基体在试件达到峰值荷载后发生突然破坏,剥落现象明显,表现出了明显的脆性性质。而混杂 PVA-ECC 由于纤维的约束作用,试件的横向变形能力显著增大,加载后期,虽然裂缝发展较宽,但由于纤维的连接作用,试件中仍没有出现基体的剥落。

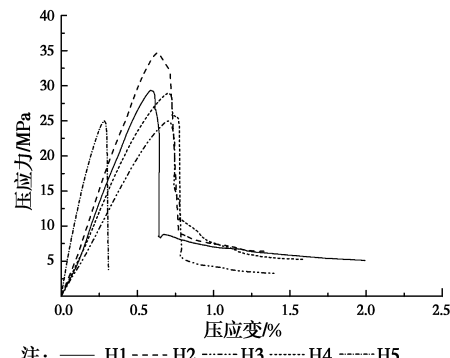
H2 由于水胶比较低,轴心抗压强度较 H1 提高了 15%。H4 与 H1 的轴心抗压强度基本相同,均达到了 29 MPa,由此可见,在纤维具有良好分散性的前提下,纤维种类对抗压强度的影响较小。H3 由于未掺入硅粉,轴心抗压强度均值为 24.8 MPa,掺入 8% 硅粉的 H1 强度较 H3 提高约 20%。由于混杂 PVA-ECC 的配合比中没有粗骨料,其弹性模量约为 17 GPa,较普通混凝土低。



注: — 7 d --- 14 d ..... 28 d ..... 90 d

图 7 不同龄期时试件 H1 的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of H1 at different ages



注: — H1 --- H2 ..... H3 ..... H4 ..... H5

图 8 28 天龄期时试件抗压应力-应变全曲线

Fig. 8 Compressive stress-strain curves of specimens at 28 days

H1 在 7、14、28、90 和 300 d 龄期时的受压性能

试验结果见表 4。由表 4 可知, H1 在 7 和 14 d 的抗压强度分别达到 28 d 强度的 55% 和 73%。混杂 PVA-ECC 后期强度增长比较明显, 90 d 试件强度较 28 d 时增长了 15%, 300 d 时抗压强度达到 42.8 MPa, 随着龄期的增长, 水泥水化作用愈加充分, 硅粉和粉煤灰的火山灰性能逐渐得到发挥。

表 4 不同龄期下 H1 试件的受压性能对比

Table 4 Compressive properties of H1 at different ages

龄期/d	轴心抗压强度/MPa	峰值压应变/%	弹性模量/GPa
7	16.2	0.69	14.27
14	21.7	0.68	15.28
28	29.6	0.61	16.31
90	34.0	0.64	17.87
300	42.8	0.58	20.10

#### 4 基于四点弯曲试验测定极限抗拉应变的反分析方法

Maalej 等<sup>[18]</sup>利用已知的拉、压应力-应变关系曲线得到了材料的弯矩-曲率曲线, Qian 等<sup>[8]</sup>基于这一思路, 建立了一种反分析方法(UM 法)。UM 法可直接使用四点弯曲试验测定的梁加载点挠度来推导 ECC 的极限拉伸应变, 适用于极限拉伸应变大于 1% 的 ECC。该方法简单易于操作, 但对应结果的误差有时较大, 可达到 20%。本文基于 UM 法, 考虑实测的 ECC 抗压强度, 提出一种改进的反分析方法, 以期能够更加合理预测材料的极限拉伸应变, 此外, 本方法也适用于极限拉伸应变小于 1% 的纤维增强水泥基复合材料。

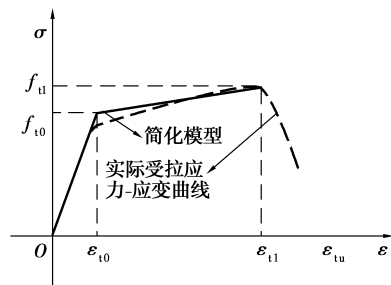
改进的反分析方法将 ECC 的拉、压应力-应变关系曲线简化为双线性模型<sup>[18]</sup>, 如图 9 所示。在弯曲试件截面应力分析时考虑材料受拉时的应变硬化性能, 根据力及力矩的平衡方程可计算出任意时刻下的弯曲荷载。使用材料力学中关于计算梁变形的的方法可得到四点弯曲试件跨中挠度的计算公式<sup>[18]</sup>

$$u = \frac{L^2}{8\rho} \quad (4)$$

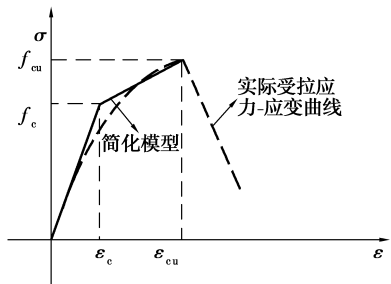
$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_t}{c} \quad (5)$$

式中:  $u$  为梁的跨中挠度;  $L$  为梁的计算跨度;  $\rho$  为梁的弯曲曲率;  $\epsilon_t$  为梁受拉区边缘的拉应变;  $c$  为梁的中和轴至受拉区边缘的高度。由此, 可以绘制出梁

完整的弯矩-挠度曲线。



(a) 受拉应力-应变曲线简化模型



(b) 受压应力-应变曲线简化模型

图 9 ECC 受拉及受压应力-应变简化模型

Fig. 9 Mechanical property of ECC under tension and compression

表 5 参数分析中材料力学性能的选取范围

Table 5 Range of material parameters used in parametric studies

开裂强度/MPa	极限拉伸强度/MPa	极限拉伸应变/%	抗压强度/MPa
2.0~5.0	3~6	0~5.0	20~90

注: ECC 的开裂应变和极限抗压应变的变化范围较小, 且对计算影响不大, 反分析计算中均取为 0.015% 和 0.55%; 计算所用的试件尺寸为 350 mm × 50 mm × 15 mm, 计算跨度为 300 mm。

式(4)和式(5)描述了梁的挠度与受拉区边缘拉应变的关系, 如能得到极限状态下挠度与中和轴高度的对应关系, 就可利用实测跨中挠度值来推测材料的极限拉伸应变值。基于 UM 方法, 利用表 5 中的 ECC 拉、压性能参数开展参数分析, 可得到不同拉、压性能参数组合下中和轴高度和跨中挠度的关系, 再采用线性最小二乘法, 拟合出 ECC 梁中和轴高度-跨中挠度曲线, 如图 10。ECC 的抗压强度可通过单轴压缩试验得到, 因此, 拟合公式  $y = A \ln(x) + B$  中的参数  $A$  和  $B$  可根据实测抗压强度进行修正, 以提高反分析方法的计算精度。将表 5 中所列的拉、压性能参数依据抗压强度进行分组, 共分为 15 组。对 15 组性能参数进行回归分析后, 可

以得到各组拟合公式中参数  $A$  和  $B$  与抗压强度的关系,再进行线性拟合,如图 11 和图 12 所示。

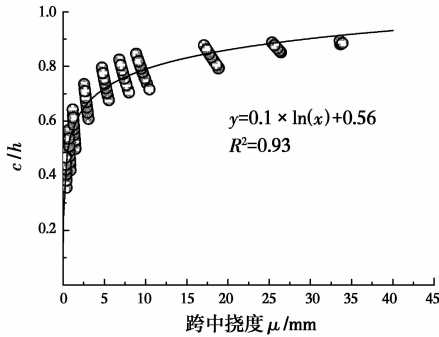


图 10 中和轴高度沿跨中挠度的分布图  
Fig. 10 Relationship between  $c/h$  and  $\mu$

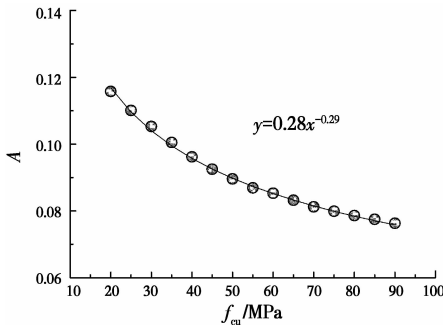


图 11 系数  $A$  沿  $f_{cu}$  的分布图  
Fig. 11 Relationship between  $A$  and  $f_{cu}$

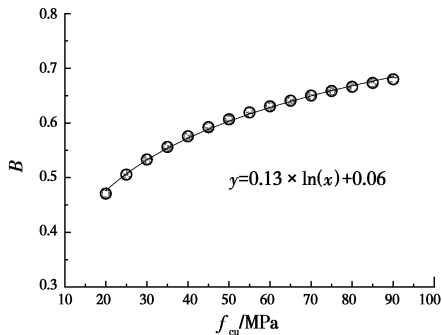


图 12 系数  $B$  沿  $f_{cu}$  的分布图  
Fig. 12 Relationship between  $B$  and  $f_{cu}$

根据上述回归分析的结果以及式(4)和式(5),可以得到预测极限抗拉应变的公式为

$$\epsilon_t = \frac{8hu}{L^2} \times (0.28f_{cu}^{-0.29} \times \ln(u) + 0.13\ln(f_{cu}) + 0.06) \quad (6)$$

式中: $f_{cu}$ 为抗压强度实测值; $h$ 为试件高度。式(6)适用于尺寸为  $350 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ,且计算跨度为  $300 \text{ mm}$ 的薄板弯曲试件。如果弯曲试验试件的尺寸或者加载模式发生变化,可根据上述思路,

重新利用弯曲模型,进行拉、压性能参数研究和相应的回归分析,得到新的预测公式。

为了验证改进的反分析方法的合理性,搜集薄板的四点弯曲试验结果,将由跨中极限挠度依据预测公式(6)计算得到的极限拉伸应变与直接拉伸试验得到的极限拉伸应变进行比较,比较结果见表 6。从表 6 中可以看出,拉伸应变实验值与计算值误差较小,可满足实际应用的精度要求。因此,可利用改进的反分析方法来预测本文混杂 PVA-ECC 的极限拉伸应变,计算结果见表 7。由表 7 可知,H1 在 90 d 时的极限拉伸应变较 28 d 时有所下降,但仍可达到 1.83%。

表 6 拉伸应变对比分析

Table 6 Comparison between measured ultimate tensile strain and theoretical one

来源	编号	抗压强度 /MPa	极限跨中挠度 /mm	拉伸应变实验值/%	拉伸应变计算值/%	计算误差/%
文献	M17	24.80	22.2	2.61	2.43	7.1
[7]	M21	26.10	40.3	4.46	4.76	6.7
	CN01	50.63	31.4	3.58	3.68	2.8
	CN04	50.18	36.2	3.66	4.30	17.6
	CN05	47.20	29.9	3.57	3.48	2.6
文献	CN06	66.56	37.2	4.23	4.49	6.2
[9]	CN07	55.89	28.6	2.97	3.34	12.4
	CN08	48.11	35.5	3.78	4.21	11.3
	CN09	60.72	18.4	1.94	2.06	6.4
	CN10	50.86	30.2	3.29	3.53	7.2

注:文献中的薄板尺寸为  $400 \times 100 \times 15 \text{ mm}$ ,计算跨径为  $300 \text{ mm}$ ,由于宽度对于上述弯曲模型没有影响,仍可利用式(6)来预测其极限拉伸应变。

表 7 极限拉伸应变的预测结果

Table 7 Predicted results of tensile strain capacity

编号	抗压强度 /MPa	极限跨中挠度/mm	拉伸应变计算值/%
H1(7 d)	16.2	23.4	2.54
H1(14 d)	21.7	20.8	2.24
H1(28 d)	29.6	19.6	2.12
H1(90 d)	34.0	17.1	1.83
H2(28 d)	34.2	16.6	1.77
H4(28 d)	29.4	26.1	2.93



## 5 结 论

1) 根据 ECC 准应变硬化模型, 结合中国产 PVA 纤维和日本产 PVA 纤维的物理力学性能, 对混杂 PVA-ECC 的纤维体积含量进行了优化分析, 建议的混杂纤维体积含量为 1% 日本产 PVA 纤维加 0.6% 中国产 PVA 纤维。

2) 混杂 PVA-ECC 试件在四点弯曲试验中均呈现出明显的应变硬化和多缝开裂的现象, 中国产 PVA 纤维的掺入和水胶比的减小都会降低材料的延性, 这主要是由于基体的粘结作用变强, 导致纤维容易拉断, 过早进入了软化阶段。H1 试件的弯曲强度在 14 d 之后趋于稳定, 而变形能力则随着龄期的增加呈减小的趋势。

3) 纤维的掺入明显改善了复合材料的压缩韧性, 混杂 PVA-ECC 试件在单轴压缩试验中, 没有出现明显的剥落现象, 完整性较好。纤维的种类对极限抗压强度影响较小, 而水胶比的减小能明显增加混杂 PVA-ECC 的极限抗压强度。硅粉的添加对复合材料的早期强度影响较小, 强度后期增长较为明显。

4) 基于 UM 法, 考虑实测的 ECC 抗压强度值, 提出一种改进的反分析方法, 并通过试验结果与计算结果的对比如验证了该方法的有效性, 并预测了本文混杂 PVA-ECC 试件的极限拉伸应变。

### 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): 2246-2264.
- [2] Li V C, Stang H, Krenchel H. Micromechanics of crack bridging in fiber reinforced concrete [J]. Materials and Structure, 1993, 162(26): 486-494.
- [3] 汪卫, 潘钻峰, 孟少平, 等. 国产 PVA 纤维增强水泥基复合材料力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014(Sup 1): 958-964.  
Wangwei, Pan Z F, Meng S P, et al. Study on mechanical properties of domestic PVA fiber reinforced cementitious composite[J]. Industrial Construction, 2014 (Sup1): 958-964. (in Chinese)
- [4] Ahmed S F U, 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): 527-539.
- [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 B F. Study on green high-toughness fiber reinforced cementitious [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] 王海超, 张玲玲, 高淑玲, 等. PVA 纤维对超高韧性纤维增强水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 混凝土, 2013(4): 4-7, 14.  
Wang H C, Zhang L L, Gao S L, et al. Experimental study on influence of PVA fiber on mechanical properties of engineered cementitious composites [J]. Concrete, 2013(4): 4-7, 14.
- [7] 潘钻峰, 汪卫, 孟少平, 等. 混杂 PVA 纤维增强水泥基复合材料力学性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 43(1): 33-40.  
Pan Z F, Wang W, Meng S P, et al. Study of mechanical properties of hybrid PVA fibers reinforced cementitious composites [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 43(1): 33-40. (in Chinese)
- [8] Qian S, Li V C. Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of strain hardening cementitious composites [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(2): 235-246.
- [9] 蔡向荣. 超高韧性水泥基复合材料基本力学性能和应变硬化过程理论分析[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2010.  
Cai X H. The basic mechanical performance and strain hardening process theoretical analysis of ultra-high toughness cementitious composites [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2008.  
Li H D. Experimental research on ultra-high toughness cementitious composites [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [11] Li V C, Wu H C. Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites [J]. Applied Mechanics Reviews, 1992, 45(8):

- 390-398.
- [12] 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): 37-48.
- [13] Wu C. Micromechanical tailoring of PVA-ECC for structural applications [D]. Michigan: University of Michigan, 2001.
- [14] 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): 173-184.
- [15] Kanda T, Li V C. Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1998, 10(1): 5-13.
- [16] Li V C, Wu C. Interface Tailoring for strain — hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. Material Journal, ACI, 2002, 104(6): 463-452.
- [17] Yang E H, Yang Y, Li V C. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness [J]. ACI Material Journal, 2007, 99(9): 303-311.
- [18] Maalej M, Li V C. Flexural/tensile strength ratio in engineered cementitious composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1994, 6(4): 513-528.

(编辑 王秀玲)