

文章编号: 1001-4888(2018)06-0987-07

橡胶粉对 PVA-ECC 力学性能影响研究^{*}

夏叶飞¹, 郑业勇², 张为民², 潘勇³, 杨才千^{2,4}, 孟春麟³

(1. 江苏华通工程检测有限公司, 江苏南京 210000; 2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105;
3. 江苏汾灌高速公路管理有限公司, 江苏连云港 222000; 4. 东南大学 土木工程学院, 江苏南京 210018)

摘要: 为研究橡胶粉对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)力学性能的影响,以掺入了橡胶粉的 PVA-ECC 为研究对象,对其强度和压缩韧性进行试验研究,并采用扫描电镜对橡胶粉表面微观形貌进行分析。研究参数包括橡胶粉掺量、改性方式及粒径。试验结果表明:相对于基准试件,橡胶粉掺量为 5% 时,试件抗压强度提高了 6%;掺量为 10% 时,试件抗压强度基本相等,压缩韧性指标有所提高;橡胶粉掺量较低时,试件呈现多裂缝失效模式,延性相对于基准试件有一定提高;橡胶粉粒径及处理方式对试件力学性能影响不大。因此,采用掺量低于 10% 的水洗橡胶粉制备 PVA-ECC 能提高其抗压强度、压缩韧性及延性,且更易制备。

关键词: 聚乙烯醇纤维增强工程水泥基复合材料(PVA-ECC); 力学性能; 复合材料; 橡胶粉
中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-018

0 引言

将废橡胶粉掺入混凝土中制备橡胶混凝土能促进废橡胶资源利用及解决废橡胶带来的环境污染问题^[1,2],同时制备的橡胶混凝土具有质量轻、抗冲击性强和耐久性好等优点^[3,4],在道路工程等领域有较好的应用前景。高性能纤维增强水泥基复合材料(HFRC)具有高延性、高韧性和显著的多裂缝开裂特征^[5-8],有效的平衡了普通混凝土强度与脆性之间的矛盾,并已在国内外修复工程等领域得到推广应用。常见的纤维类型为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚乙烯醇(PVA)等^[9,10],由于聚乙烯醇纤维相对便宜,国内对聚乙烯醇纤维水泥基复合材料(PVA-ECC)的研究较多。目前,将废橡胶粉掺入 PVA-ECC 制备新型水泥基复合材料的研究尚在起步阶段。胡苗等^[11]研究了橡胶粉对其韧性的影响,发现橡胶粉掺量较小时,这种新型水泥基复合材料具有较好的强度、较高的韧性和较低的弹性模量,为水泥混凝土路面的减震降噪提供了可能。

本文考虑了影响橡胶混凝土力学性能的三个重要因素:橡胶表面改性方式、橡胶掺量及橡胶粒径,对橡胶粉制备 PVA-ECC 的强度、压缩韧性及应力-应变曲线进行了试验研究,并采用扫描电镜分析微观分析了改性方式对橡胶粉表面的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

水泥采用中材湘潭水泥厂生产的 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥;聚乙烯醇纤维由日本可乐丽公司生

^{*} 收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-04-01

基金项目: 湖南省重点研发计划(2018WK2111), 湖南省创投项目(2018GK5028), 国家自然科学基金青年项目(51708476), 湖南省自然科学基金项目(2017JJ3302)资助

通讯作者: 杨才千(1974-), 男, 博士, 教授。主要从事先进传感与结构健康监测、新型 FRP 与 FRP-混凝土复合结构、智能材料与结构、装配式一体化墙体材料与结构方面的研究。Email: yecjxx@hotmail.com

产,成品为束状的纤维。PVA纤维的性能见表1。减水剂为江苏苏博特新材料股份有限公司生产的PCA-I型聚羧酸高效减水剂。精细石英砂的粒径为120目,密度为 $2.18 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。橡胶粉(Rubber Powder,以下简称RP)由橡胶回收工厂生产,粒径为60目和120目两种,密度为 $0.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。粉煤灰为湘潭电厂生产的一级粉煤灰。

表1 PVA纤维的性能

Tab.1 Properties of PVA fibers

长度/mm	直径/mm	断裂伸长率/%	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m^3)
12	39	6	42.8	1560	1300

1.2 试件制备

研究过程中为避免其他因素对试验结果的影响,水泥基复合材料的基准配合比保持不变(表2),橡胶粉掺入方式采用等体积替代细骨料,两种橡胶粉的替代率均为0%、5%、10%、20%、30%和50%。橡胶粉等体积替代细骨料配合比如表3所示。由于橡胶为高分子有机物质,表面为非极性,而水泥基体为无机物,表面为极性,两者的界面性能相差较大,从而导致橡胶粉与水泥基体的界面粘结性能差,使得混凝土的强度降低。为改善两者粘结性能,借鉴国外关于橡胶粉表面改性方式^[12,13],采用水洗和饱和的氢氧化钠溶液浸润对橡胶粉进行表面改性处理,处理后的橡胶粉表面微观形貌见图1。本文试件命名规则:PRE-H(N)-6(1),H(N)表示橡胶粉改性方式为 H_2O 或 NaOH 溶液处理,6(1)表示橡胶粉粒径为60(120)目。

表2 PVA-ECC的基准配合比(kg/m^3)Tab.2 Benchmark mix of the PVA-ECC (kg/m^3)

水泥	一级粉煤灰	120目石英砂	高效减水剂	水	PVA纤维
393	865	457	5	311	26(2% by volume)

表3 橡胶粉等体积替代细骨料配合比(kg/m^3)Tab.3 Rubber powder instead of fine aggregate ratio (kg/m^3)

橡胶(替代率)	0(0%)	9(5%)	18(10%)	36(20%)	54(30%)	91(50%)
石英砂	457	434	411	366	320	229

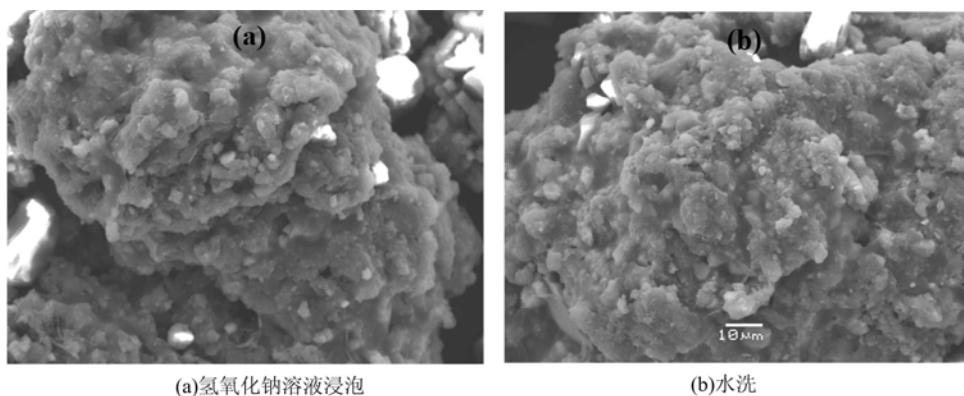


图1 120目橡胶粉表面微观形貌

Fig.1 The surface microstructure of the rubber powder

单轴拉伸试件空间尺寸参考日本推荐规范设计,采用哑铃型试件,试件尺寸为 $330\text{mm} \times 60\text{mm} \times 13\text{mm}$,中部受拉测试尺寸为 $50\text{mm} \times 30\text{mm} \times 13\text{mm}$ 。单轴受压试验采用尺寸为 $\Phi 76\text{mm} \times 152\text{mm}$ 的圆柱体试件^[14],每组3个试件。

橡胶粉密度较小,在搅拌和振捣过程中容易出现上浮现象,导致浆体表面析出均匀分布的黑点。添加适量的增稠剂能提高浆体的粘度,减少橡胶粉上浮。同时由于成品纤维为束状结构,为使纤维在搅拌

过程中均匀分散,其掺入速度应得到有效控制。从而使两种材料在基体中分布趋于均匀、连续。具体的试验步骤为:先取部分胶凝材料及石英砂进行搅拌混合,而后倒入一定量的水和减水剂的混合溶液;在快速搅拌过程中再逐步添加纤维;最后将剩余的材料全部掺入进行搅拌,直至充分均匀。

1.3 加载方案

拉伸试验选用美斯特电子万能试验机,试件两尾端通过双钢板夹持设计实现力传递。试验采用位移加载,加载速率为 0.2mm/min。选用 YWD 位移传感器,测距为 50mm,试验装置见图 2。在受压试验正式加载前进行预加载,加载幅值约为立方体抗压强度的 30%~40%,并重复加载 3 次。位移加载速率为 0.05mm/min。

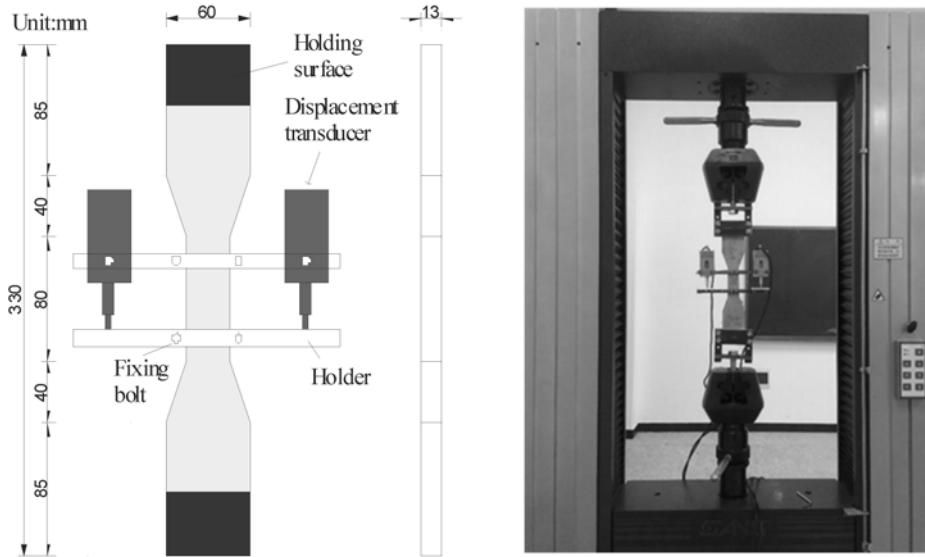


图 2 单轴拉伸试件尺寸及试验设备

Fig. 2 Dimension of the specimen and set-up of the uniaxial tensile test

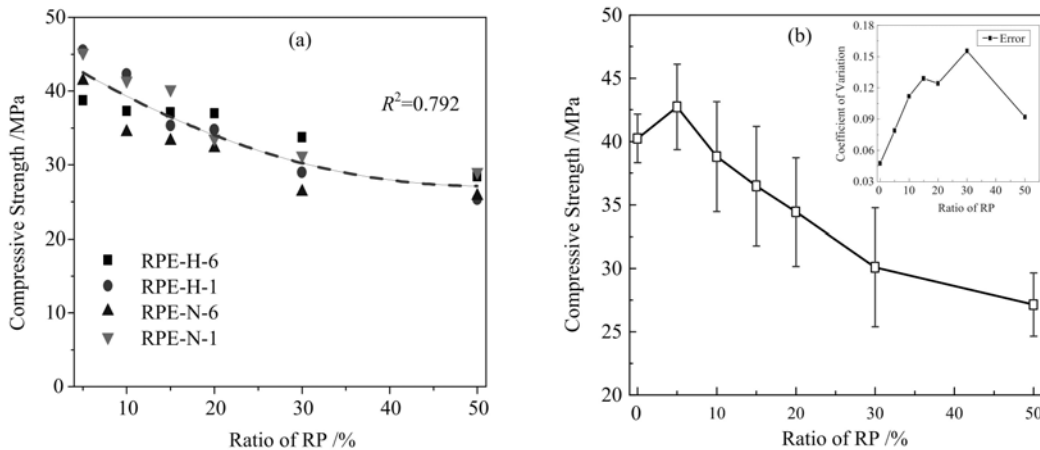


图 3 抗压强度与(a)橡胶处理方式及粒径;(b)基准试件的关系

Fig. 3 Relationship between compressive strength with (a) different modification methods and particle size of rubber; (b) COV

2 试验结果

2.1 抗压强度

未掺橡胶粉的 PVA-ECC 作为基准试件,试件养护 28d 后,测得其立方体抗压强度为 40.4MPa。图 3(a)表明,随着橡胶粉掺量提高,其抗压强度呈现抛物线下降趋势。同时橡胶粉不同的处理方式及粒径随橡胶粉掺量变化呈现相近趋势,表明处理方式及粒径对强度影响较小。与基准试件进行对比,从

图3(b)中可以看出,橡胶粉掺量低于5%时,复合材料抗压强度有一定提高。然而,当掺量超过10%时,抗压强度呈现下降规律。从该现象可以判定,橡胶粉的掺量存在某个最优配合比,水泥基复合材料各部分能充分发挥其力学性能,低于或超过此范围将会降低其抗压强度。

在橡胶粉掺量比例10%以内时,抗压强度离散性有所提高,而后基本保持稳定。这可能是由于橡胶粉的掺入增加基体本身的内部缺陷且减弱了水泥浆与骨料接触带来的粘结。掺量不超过10%时复合材料的抗压强度能达到40MPa,满足一般工程上的要求。

2.2 抗拉强度

图4反映了橡胶粉掺量与试件抗拉强度之间的关系。图4(a)表明,随着橡胶粉掺量提高,抗拉强度呈现下降趋势,且变化规律与图3(a)相同。从图4(a)可以看出,改性方式与橡胶粒径对抗拉强度的影响不大。出现这种现象的原因可能是在橡胶粉掺量相对较小的情况下,水的表面处理去除了橡胶粉表面灰尘,提高了颗粒与基体的接触面积;氢氧化钠溶液的表面处理降低界面过渡区孔隙度,提高了橡胶骨料与水泥基体之间的粘结强度。此外强碱并不会改变橡胶粉表面的粗糙程度(图1所示),使得两种改性方式产生的效果差异不明显。

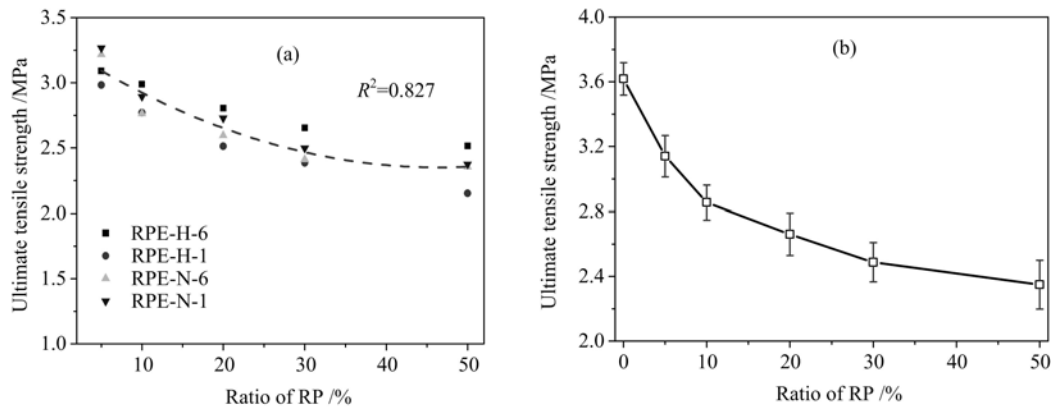


图4 极限抗拉强度与(a)橡胶处理方式及粒径;(b)基准试件的关系

Fig. 4 Relationship between ultimate tensile strength with (a) modification methods and particle size of rubber; (b) COV

本试验测得基准试件的抗拉强度为3.62MPa。相对于基准试件,抗拉强度在橡胶粉掺量0%~10%时下降幅度较大,掺量10%时下降了22%;超过临界值10%以后,抗拉强度下降的幅度趋于平缓。其主要原因是水泥基复合材料中的橡胶粉不参与反应,橡胶粉在试件内部充当填充物。橡胶粉的加入削弱了水泥基体与纤维的桥接界面粘结性能,降低了纤维拉拔时的作用力。替代率提高增加了薄弱区域,导致试件的抗拉强度下降。同时,由于橡胶粉所占的总体积相对较小,即使掺量达到50%,试件仍能保持一定强度。

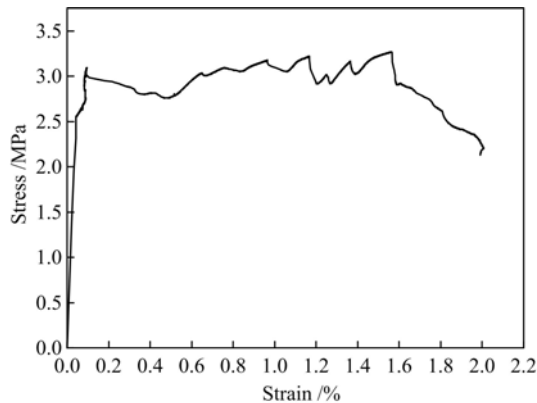


图5 单轴拉伸应力—应变关系

Fig. 5 Tensile stress-strain relationship of the PVA-ECC

2.3 单轴拉伸应力—应变关系

添加橡胶粉后,受拉过程中仍然保持纤维增强水泥基复合材料所具有的应变硬化特征。开裂强度随掺量的增加而大幅下降,但是其极限应变相对于基准试件,先增加后缓慢降低。试验发现,未掺橡胶粉的基准试件表面出现第一条裂缝后,裂缝迅速扩展,进而贯穿整个截面。而添加少量橡胶粉的试件,表面会出现密集的微裂缝,随着荷载增大逐步发展成主断裂裂缝,曲线显得稍微平缓。可以从图5所示橡胶粉掺量5%的RPE-H-1应力—应变关系看出,应力在后期缓慢波动上升。Li等^[15]基于细观力学提出,纤维的最

大桥接应力大于基体开裂强度是多裂缝开裂的必要条件。橡胶粉的加入虽然降低了复合材料的弹性模量,但同时也降低了开裂强度,从而更容易实现多裂缝的失效模式(图 6)。

2.4 压缩韧性性能

压缩韧性指标是反映材料抗压强度及延性的一个综合性指标。图 7 为橡胶粉掺量 10% 的 RPE-H-1 试件受压全过程曲线及压缩韧性计算示意图。曲线结果表明,弹性段终点约为峰值荷载的 75%,即 $0.75F_{max}$ 。压缩韧性指数 I5、I10、I30 计算方法参照《钢纤维混凝土标准》^[16],结果见图 8。

图 8 中橡胶粉掺量为 0% 的 PVA-ECC 基准试件,其韧性数据基于文献[13]。图 8 结果表明,橡胶粉掺量为 10% 的复合材料各压缩韧性指数明显大于基准复合材料;当掺量提高至 20% 时,压缩韧性指数基本与基准试件相同。因此,从压缩韧性角度分析,10% 的橡胶粉掺量有利于提高试件压缩韧性、延性及耗能能力。同时,前述结果表明,10% 掺量试件抗压强度与基准试件相近。

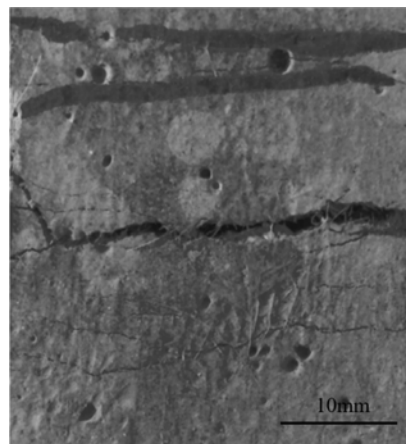


图 6 多裂缝失效模式示意图

Fig. 6 Multi-fracture morphology mode

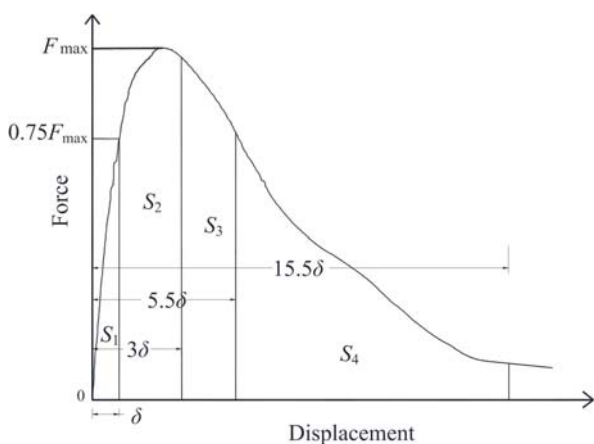


图 7 荷载—位移曲线及压缩韧性指数

Fig. 7 Load displacement-curve and compression index

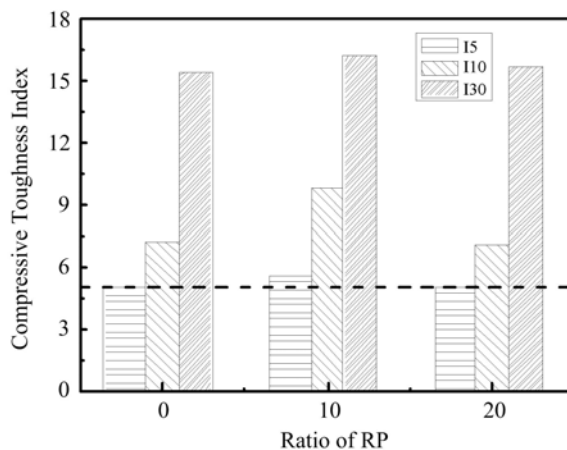


图 8 橡胶掺量与压缩韧性指数的关系

Fig. 8 Relationship between the rubber powder and the compression toughness index

3 结论

本文研究了橡胶粉掺量对 PVA-ECC 力学性能的影响,结论如下:

(1) 水洗和氢氧化钠溶液浸泡两种橡胶粉改性方式及橡胶粉粒径对 PVA-ECC 力学性能影响不大,橡胶粉掺量是控制因素之一。

(2) 橡胶粉掺量在 10% 以内时,复合材料抗压强度及压缩韧性略高于 PVA-ECC。掺量超过 10% 时,虽然抗压强度低于基准试件,但压缩韧性大致接近。因此,当橡胶粉掺量在 10% 以内时,对提高试件压缩韧性指数及抗压强度有利。

(3) 橡胶粉掺量为 5% 时,试件抗拉强度虽然有所降低,但试件单轴应力—应变曲线呈现缓慢上升,更有利于实现延性破坏形式。

参考文献:

- [1] 蒋连接, 杜彬, 佟彤. 废橡胶粉在混凝土中的资源化利用[J]. 混凝土, 2014(6):108—111 (JIANG Lianjie, DU Shan, TONG Tong. Resource utilization of crumb rubber in concrete[J]. Concrete, 2014(6):108—111 (in Chinese))
- [2] 王林龙, 简宇桥, 童代伟, 等. 橡胶混凝土研究进展[J]. 公路交通技术, 2017, 33(1):17—20 (WANG Linlong, JIAN Yuqiao, TONG Daiqiao, et al. Research proceedings of rubber concrete[J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(1):17—20 (in Chinese))
- [3] Al-Tayeb M, Bakar B H, Ismail H, et al. Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: Experiment and simulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 59(18):284—289.
- [4] Sukontasukkul P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(3):1084—1092.
- [5] 易成, 谢和平, 鞠杨, 等. 混凝土与纤维混凝土的劈裂试验及损伤描述[J]. 实验力学, 2003, 18(4):529—537 (YI Cheng, XIE Heping, JU Yang, et al. Damage description for concrete and fiber concrete under tensile loads [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(4):529—537 (in Chinese))
- [6] 欧进萍, 刘铁军, 梁超锋. 复合纤维增强混凝土阻尼测试装置开发与试验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(4):403—410 (OU Jinpin, LIU Tiejun, LIANG Chaofeng. Development of damping measuring instrument and experimental research for hybrid reinforced concretes[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(4):403—410 (in Chinese))
- [7] 贺晶晶, 师俊平, 王学志. 纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J]. 实验力学, 2017, 32(1):113—122 (HE Jingjing, SHI Junping, WANG Xuezhi. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural toughness[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):113—122 (in Chinese))
- [8] Wang S, Wu C, Li V C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. Aci Materials Journal, 2001, 98(6):483—492.
- [9] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC) a review of the material and its applications[C]//中国混凝土与水泥制品协会纤维混凝土工程材料 2012 高峰论坛论文集, 北京, 2012:43—58.
- [10] Li V C. Reflections on the research and development of engineered cementitious composites (ECC)[J]. Concrete Science and Engineering, 2002, 19(4):173—184.
- [11] 胡苗, 周娟兰, 李永鹏. 橡胶粉对 PVA 纤维增强水泥基复合材料韧性的影响[J]. 混凝土, 2015(4):108—110, 114 (HU Miao, ZHOU Juanlan, LI Yongpeng. Effect of rubber powder on the toughness of PVA fiber reinforced cement-based composition[J]. Concrete, 2015(4):108—110, 114 (in Chinese))
- [12] Rivas-Vázquez L P, Suárez-Orduna R, Hernández-Torres J, et al. Effect of the surface treatment of recycled rubber on the mechanical strength of composite concrete/rubber[J]. Materials & Structures, 2015, 48(9):2809—2814.
- [13] Meng D, Huang T, Zhang Y X, et al. Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141 (Supplement C):259—270.
- [14] Fischer G, Li V C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions[J]. Aci Structural Journal, 2011, 99(6):781—790.
- [15] Li V, Leung C. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Aci Structural Journal, 2011, 118:2246—2264.
- [16] 纤维混凝土方法标准: CECS 13—2009[S]. 大连: 中国计划出版社, 2010 (Fiber Concrete Method Standard: CECS 13—2009[S]. Dalian: China Planning Press, 2010 (in Chinese))

Study on the effect of rubber powder on mechanical properties of PVA-ECC

XIA Ye-fei¹, ZHENG Ye-yong², ZHANG Wei-min²,
PAN Yong³, YANG Cai-qian^{2,4}, MENG Chun-lin³

(1. Jiangsu Huatong Engineering Co. Ltd, Nanjing 210000, Jiangsu, China; 2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 3. Jiangsu Fenguan Highway Management Co. Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China; 4. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the effect of rubber powder on the mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites (PVA-ECC), the strength and compression toughness of PVA-ECC with rubber powder were investigated experimentally. The microscopic surface morphology of rubber powder was analyzed by scanning electron microscope (SEM). The studied parameters include the amount of rubber powder, modification method and particle size. Experimental results show that compared with the reference specimen, the compressive strength of specimen increases by 6%, when the rubber powder is added to the sample with a content of 5%. When the rubber powder content is 10%, the compressive strength of the specimen is basically equal. Compression toughness index has been improved. When the content of rubber powder is low, the specimen presents multi-crack failure mode, and its ductility is improved compared with the reference specimen. The effect of rubber particle size and modification method on composite mechanical properties can be negligible. Therefore, a small amount of the rubber powder mixed with PVA-ECC can improve its mechanical properties.

Keywords: Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC); mechanical properties; composite materials; rubber powder