

Relationship between Compressive Strength and Flexural Strength of PVA-DSECC

Yixin Zhang, Jialing Che, Guoping Xia, Dan Wang, Wei Guo

School of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia
Email: 1776657592@qq.com

Received: Oct. 11th, 2018; accepted: Nov. 1st, 2018; published: Nov. 7th, 2018

Abstract

The Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC) is prepared by using polyvinyl alcohol fiber, which has the characteristics of multi-crack cracking, high toughness and high ductility. The test uses desert sand instead of some common river sand to prepare PVA-ECC (referred to as PVA-DSECC), and the PVA-DSECC test block is tested for compression and flexural strength. The relationship between compressive strength and flexural strength is established. The influence of age on the parameter a in the equation is analyzed, and the parameter a increases with the increase of the age.

Keywords

PVA-DSECC, Compressive Strength, Flexural Strength, Conversion Relationship

PVA-DSECC抗压与抗折强度关系

张艺馨, 车佳玲, 夏国平, 王丹, 郭威

宁夏大学, 土木与水利工程学院, 宁夏 银川
Email: 1776657592@qq.com

收稿日期: 2018年10月11日; 录用日期: 2018年11月1日; 发布日期: 2018年11月7日

摘要

采用聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol Fiber)制备高延性纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite) (简称PVA-ECC), 具有多裂缝开裂、高韧性、高延展性等特性。试验采用沙漠砂代替部分普通河砂制备PVA-ECC (简称PVA-DSECC), 对PVA-DSECC试块进行抗压、抗折强度测试。建立抗压强度与抗折强度关系式; 分析龄期对关系式中参数 a 的影响, 参数 a 随龄期的增加而增大。

关键词

PVA-DSECC, 抗压强度, 抗折强度, 换算关系

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高延性纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, 简称 ECC)最早是由美国密歇根大学的 Victor C. Li 教授提出,它是基于微观力学和断裂力学原理设计,具有多裂缝开裂、高延展性和高韧性的特性。鉴于 ECC 材料诸多优异性能,工程应用前景良好,近年来国内外学者对 ECC 进行多方位多角度的深入研究,主要在力学性能、耐久性、工程应用方面进行了大量试验研究,具体包括直接拉伸性能、抗压性能、弯曲性能、延性、抗侵蚀性、抗冲击性等。目前美国、日本已将其运用在水利工程、桥梁工程、道路路面工程、地下工程、抗震结构、修复结构等方面,并取得了很好的效果[1]。如日本采用 ECC/钢复合建造的北海道斜拉索桥,广岛县采用 ECC/钢复合板修复 Mitaka 大坝[2],美国采用 ECC 连接板建造的 Michigan 大桥等[3]。

由于天然砂资源日益匮乏,部分学者利用资源丰富的沙漠砂代替天然砂制备绿色环保 ECC 材料,从力学性能、耐久性能等方面进行了大量研究。M. Iqbal Khan [4]等提出用阿拉伯沙漠砂制备的 ECC 和用硅砂制备的 ECC 的拉伸延性性能相当。本课题组[5] [6]提出水胶比、粉煤灰替代量对材料的抗压强度有较大影响;而沙漠砂替代率对抗劈裂强度、抗压强度、抗折强度影响较小;并且提出钢纤维能够提高 ECC 试件的劈裂抗拉强度,PVA 纤维可以增强试件的抗弯强度;使用沙漠砂制备 ECC 时,沙漠砂最高替代率高达 90%。

课题组在前期研究基础上,进一步对 PVA-DSECC 的抗压强度和抗折强度关系进行研究分析,旨在确定 PVA-DSECC 抗压-抗折强度间的换算关系,这对工程建设具有很好的指导意义,如根据抗压强度与抗折强度换算公式,可方便快捷的对现场质量进行指导和控制[7]。

2. 试验

2.1. 试验原材料

水泥: P·O 42.5R 级普通硅酸盐水泥;粉煤灰: I 级粉煤灰,细度 8.4%,含水率 0.4%,水量比 90%,烧失量 3%;纤维: 日本可乐丽公司生产的直径为 31 μm ,长度为 12 mm 聚乙烯醇维(PVA 纤维),其抗拉强度 1400~1600 MPa,干断裂伸长度(17 \pm 3.0)%,伸长率为 6%,杨氏模量 \geq 380 GPa;细骨料: 1) 粒径不大于 1.18 mm 的水洗河砂,; 2) 宁夏盐池县毛乌素沙漠砂,表观密度 2624 kg/m^3 ,含泥量 0.14%,细度模数 0.14 [8];水为实验室自来水;外加剂: 减水率为 30%的聚羧酸高性能减水剂。

2.2. 试验配合比

课题组前期对 PVA-DSECC 材料力学性能进行了研究,得到 PVA-DSECC 抗压强度、抗劈裂和抗折强度的最优配合比,其中:水胶比(质量比) 0.29;砂胶比(质量比) 0.36;粉煤灰等质量替代水泥 40%;沙漠砂等质量替代天然河沙量为 40%;PVA 纤维掺入量为试块体积的 1.75%。配合比算量如表 1 所示。

Table 1. Ratio calculation
表 1. 配合比算量

水胶比	砂胶比	配合比算量/g					
		水	水泥	粉煤灰	河沙	沙漠砂	PVA 纤维
0.29	0.36	9529.00	19714.98	13143.23	7097.39	4731.60	623.81

2.3. 试件制备

为使 PVA 纤维在基体中分散的更均匀, 更好的发挥 PVA 作用, PVA 纤维采用后掺法。试件制备如图 1 所示, 具体制备工艺如下: 1) 将胶凝材料(水泥和粉煤灰)、沙漠砂、河砂干拌 2 min; 2) 将水和减水剂混合后倒入搅拌锅湿拌 2 min; 3) 将 PVA 纤维分散地加入搅拌机搅拌 3 min; 4) 搅拌结束后进行试件浇筑, 并振捣夯实; 5) 试块自然养护 24 h 后拆模, 放入标准养护室内养护至龄期。



Figure 1. Test piece preparation
图 1. 试件制备

2.4. 试验方法

为确定 PVA-DSECC 抗压-抗折强度关系式, 试验设计 3 个龄期(7 d, 28 d, 56 d), 每个龄期做 5 组, 其中每组做 3 个尺寸为 $70.7 \times 70.7 \times 70.7$ mm 的立方体试块, 3 个尺寸为 $40 \times 40 \times 160$ mm 的抗折试块。试件试验测定过程如图 2 所示, 具体参照 GB/T50081-2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行抗压强度和抗折强度测试,

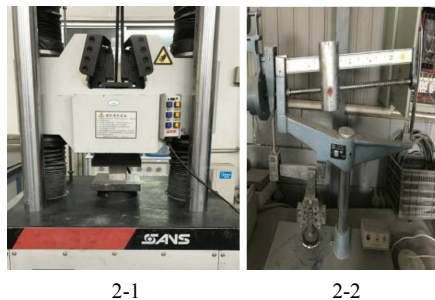


Figure 2. Test piece mechanical properties measuring instrument
图 2. 试件力学性能测定仪器

3. 试验结果

通过观察试件破坏全过程, 发现 PVA-DSECC 试块并非如普通混凝土般发生脆性破坏, 而是在受力

区多裂缝开展。PVA-DSECC 具体破坏情况和裂缝形态如图 3 所示, 荷载与裂缝宽度呈正相关, 即随着荷载的提高, 裂缝宽度也随之增大。当荷载达到峰值时, 试块会随着主裂缝的扩大而被破坏。由于卸荷后主裂缝周围的微细裂缝处张力的减弱, 裂缝会发生闭合, 实际裂缝要略多于图 3。PVA-DSECC 的抗压强度及抗折强度试验结果如表 2 所示。

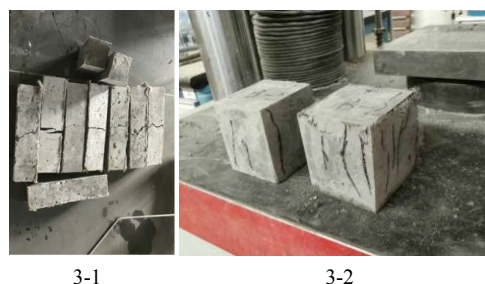


Figure 3. Test piece damage and crack shape
图 3. 试件破坏情况及裂缝形态

Table 2. Compressive strength and flexural strength

表 2. 抗压强度和抗折强度(7 d、28 d、56 d)

组别	7 d		28 d		56 d	
	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)	抗压强度(MPa)	抗折强度(MPa)
1	55.41	12.84	58.31	14.1	65.32	20.13
2	52.1	10.32	60.32	16.1	70.32	18.32
3	56.78	9.48	65.13	14.32	63.32	15.32
4	50.31	11.32	57.13	10.32	62.32	12.32
5	48.61	11.32	58.01	14.13	64.32	14.78

4. 抗压强度与抗折强度之间的换算关系

目前, 国内外给出多种抗压强度与抗折强关系式, 如 ACI Committee、CEB-FIP、美国波特兰水泥协会、日本水泥协会、中国交通部等给出的抗压强度与抗折强度关系式, 具体如表 3 所示。由表 3 可知, 国内外提出的混凝土抗压-抗折强度关系式虽各不相同, 但都表现出抗折-抗压强度具有很强的相关性。

由表 2 可知, PVA-DSECC 的抗压强度与抗折强度呈正相关, 即随着抗压强度的增加, 相应的抗折强度也随之提高。如图 4 所示, 根据抗折、抗压强度数据, 作出抗压-抗折强度散点图, 并参考国内外规范, 采用线性函数 $f_t = Af_{cu,m} + B$ 对其进行拟合, 得出抗压-抗折强度之间的关系式, 如式(1)所示。结果表明线性拟合良好, 但由于试块数量不足, 试验存在一定的误差, 试验拟合得到 PVA-DSECC 抗压强度与抗折强度关系式的相关性 $R^2 = 0.574$ 并不是很高。

$$f_t = 0.376f_{cu,m} - 8.565 (R^2 = 0.574) \quad (1)$$

式中, f_t 表示抗折强度, $f_{cu,m}$ 代表抗压强度。

式(1)与美国波特兰水泥协会提出的 $f_t = 1.32 + 0.0943f_{cu,m}$ 相比, $f_{cu,m}$ 的系数较高, 其主要原因是高强度高弹模 PVA 纤维的掺入, 提高了 PVA-DSECC 的韧性和抗折性能。1) 从宏观角度分析, 试块受外部荷载时, 受力区呈多裂缝开裂, 试块在破坏之前能够吸收大量的外部能量, 并且微裂缝发展速度较为缓慢, 此外, PVA 纤维对主裂缝扩大有一定阻碍作用, 从而延缓了裂缝的发展和试块的破坏。2) 从微观角

度分析, PVA 纤维与基体之间结合面具有很强的粘结性, 试块在出现裂缝后, PVA 纤维连接在裂缝两侧, 在其被拔出的过程中能够抵消外部荷载, 阻碍裂缝继续扩大, 从而提高试块的韧性。因此, 与普通混凝土相比, PVA-DSECC 材料的抗折、变形性能更加优越, 抗压-抗折强度关系式中 $f_{cu,m}$ 的系数也较高。

Table 3. Compressive-reflex strength relationship

表 3. 抗压-抗折强度关系式

来源	公式
ACI Committee [9]	$f_t = 0.53 f_{cu,m}^{0.5}$
CEB-FIP [10]	$f_t = 0.81 f_{cu,m}^{0.5}$
美国波特兰水泥协会[11]	$f_t = 1.32 + 0.0943 f_{cu,m}$
日本水泥协会[11]	$f_{cu,m} = 7.82 f_t - 15.56$
中国交通部[11]	$f_t = 0.453 f_{cu,m}^{0.713}$
河南省 107 国道[11]	$f_t = 3.63 + 0.0575 f_{cu,m}$
交通部公路所和唐山交通局[11]	$f_t = 1.205 + 0.121 f_{cu,m}$
山西省公路局[11]	$f_t = 0.146 + 0.182 f_{cu,m}$

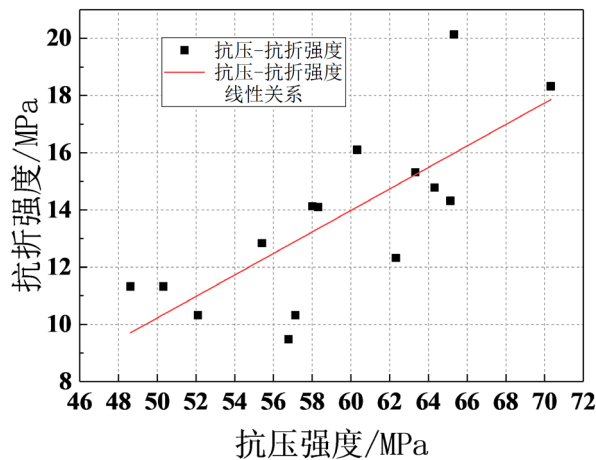


Figure 4. Relationship between compressive strength and flexural strength of PVA-DSECC

图 4. PVA-DSECC 抗压强度与抗折强度的关系

5. 龄期对抗压强度-抗折强度关系的影响

根据式(1), 令 $f_t = a f_{cu,m} - 8.565$ (其中 a 为待定参数), 分别计算 7 d、28 d、56 d 的参数 a 值, 结果如表 4 所示。由表 4 可知, PVA-DSECC 抗折强度和抗压强度关系式中的参数 a 并非一个确定的值, 而是一个关于龄期的函数, 随着龄期的增长而不断提高。如图 5 所示, 根据表 4 中的平均值, 作龄期与参数 a 的关系图。参数 a 的拟合关系式如下所示, 由于试验误差, 拟合函数的相关性 $R^2 = 0.81757$ 并不很高。

$$a = 0.00011x + 0.37245 (R^2 = 0.81757) \quad (2)$$

参数 a 之所以随龄期 t 的增加显著增大, 是由于粉煤灰的掺入。粉煤灰有助于试块后期强度的提高, 试块的抗压强度在 7 天到 28 天大幅上升, 28 天后抗压强度虽有增加但增加趋势较为平稳, 而抗折强度从龄期 7 d 到 56 d 均处于明显上升趋势。抗压强度和抗折强度在龄期内的增长规律, 诠释了参数 a 随龄

期 t 明显增大这一现象。

Table 4. The value of the parameter a to be determined
表 4. 待定参数 a 的数值

组别	7 d	28 d	56 d
1	7.99	7.82	4.43
2	9.27	6.58	8.12
3	11.87	10.17	8.49
4	7.60	11.16	11.11
5	6.96	7.68	6.4
平均值	8.74	8.68	7.71

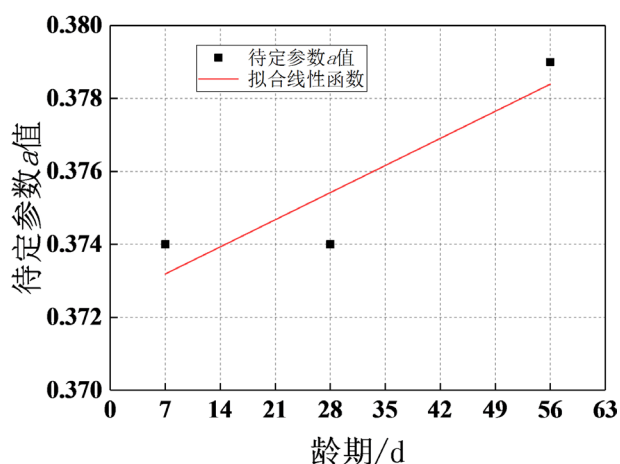


Figure 5. Relationship between age and parameter a
图 5. 龄期与参数 a 的关系图

6. 结论

通过对 PVA-DSECC 进行抗压强度和抗折强度试验，得出结论：

- 1) 提出抗压-抗折强度关系式；
- 2) 分析龄期对关系式中参数 a 的影响，结果表明，参数 a 随着龄期的增长而增大；
- 3) 提出参数 a 与龄期的函数关系式。

基金项目

宁夏自然科学基金资助项目(NZ15043)，2018 年大学生创新创业训练计划项目(X2018107490847)。

参考文献

- [1] 徐涛智, 杨医博, 梁颖华, 郭文瑛. 聚乙烯醇纤维增韧水泥基复合材料研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(6): 39-44.
- [2] Kojima Sakata, N., Kanda, T. and Hiraishi, M. (2004) Application of Directsprayed ECC for Retrofitting Dam Structure Surface-Application for Mi-Taka-Dam. *Concrete Journal*, **42**, 135-139.
- [3] Li Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531-536.
- [4] Khan, M.I., Fares, G. and Mourad, S. (2017) Optimized Fresh and Hardened Properties of Strain Hardening Cementi-

tious Composites: Effect of Mineral Admixtures, Cementitious Composition, Size, and Type of Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, No. 10.

- [5] 韩冠生, 车佳玲, 李权威, 马彩霞, 刘海峰. 沙漠砂 PVA-ECC 材料力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(3): 27-31.
- [6] Che, J.L., Li, Q.W., Lee, M.G. and Wang, D. (2017) Experimental Research on Mechanical Properties of Desert Sand Steel-PVA Fiber Engineered Cementitious Composites. *Journal of Functional Materials*, 24, 584-592. <https://doi.org/10.15407/fm24.04.584>
- [7] 蔡正咏, 李世绮. 路面水泥混凝土抗折强度的经验关系[J]. 中国公路学报, 1992(1): 14-20.
- [8] 刘海峰, 马菊荣, 付杰, 等. 沙漠砂混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2015(9): 80-83.
- [9] ACI Committee 318. (2011) Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI318-11) & Commentary. American Concrete Institute, Michigan.
- [10] CEB-FIP. (1990) Model Code for Concrete Structure: CEB-FIP International Recommendations. Paris.
- [11] 杨文科. 试论抗压与抗折的辩证关系及综合值的概念[J]. 混凝土, 2003(8): 13-16 + 33.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org