

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.04.015

国产某 PVA 纤维对混凝土早期开裂 和干燥收缩的影响

张云杰

(内蒙古工业大学 矿业学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 目前, 聚乙烯醇纤维混凝土 (Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete) 主要使用进口 PVA 纤维, 其高昂的成本限制了其工程应用, 使用国产 PVA 纤维可以有效降低成本。以纤维掺量 (0%、0.9%、1.2%、1.6%) 及纤维长度 (8 mm、12 mm) 为参数, 设计制作了 6 组 PVA 纤维混凝土平板法早期开裂试件及 6 组干燥收缩试件, 研究了 PVA 纤维对混凝土早期抗裂性能和抗干燥收缩性能的影响。结果表明: PVA 纤维混凝土早期抗裂性能高于普通混凝土, 且在掺加纤维长度为 8 mm, 掺量为 1.6% 时, 纤维抗裂性能提升最大; 抗干燥收缩性能高于普通混凝土, 且存在最佳纤维掺量, 使抗干燥收缩性能提升最大。

关键词: 聚乙烯醇纤维混凝土 (PAFC); 纤维掺量; 早期开裂; 干燥收缩

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0098-06

Effects of a Domestic PVA Fiber on Early Crack and Drying Shrinkage of Concrete

ZHANG Yunjie

(Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete's engineering application is under influence of using imported PVA fiber and its high cost. Using domestic PVA fiber can decrease the cost effectively. In order to analyze the early cracking resistance and drying shrinkage property of the domestic PVA fiber concrete, 6 groups of matrixes are designed for each test, and parameters are fiber contents (0%, 0.9%, 1.2%, 1.6%) and fiber lengths (8 mm, 12 mm). The results indicates that the early cracking resistance and drying shrinkage property of the domestic PVA fiber concrete are higher than normal concrete. When the length is 8mm and the content is 1.6%, the early cracking resistance reaches the maximum value; and the optimum content exists in the drying shrinkage test.

Keywords: Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete (PAFC); fiber content; early cracking; drying shrinkage

纤维混凝土广泛应用于我国各地的桥梁工程、水工建筑物中^[1-3]。纤维的掺加可显著改善混凝土的工作性能, 目前国内外学者对纤维混凝土的抗裂性能进行了研究并取得了大量成果。Qi C 等^[4]研究了不同掺量的聚丙烯纤维对混凝土早期开裂的影响, 掺加聚丙烯纤维使混凝土早期裂缝宽度大幅降低。Sivakumar 等^[5]对混杂纤维混凝土的收缩开裂进行了研究, 在混凝土内掺加纤维可明显减少收缩裂缝, 且非金属纤维含量的增加可以在削弱混凝土

部分工作性能的同时显著提升其抗裂性能。邢通等^[6]对不同掺量钢-聚丙烯纤维混凝土的早期开裂进行了研究, 混杂纤维可以发挥出正混杂效应, 提高早期抗裂能力。唐明等^[7]采用平板法对聚丙烯纤维混凝土早期开裂状态进行了研究, 结果表明: 随着纤维掺量的增加、纤维长度的增长, 其对混凝土的抗裂性能提升也越大。

PVA 纤维模量高、强度高、耐酸碱, 目前受到了广泛关注和研究, 掺加 PVA 纤维可以大幅度提高混

凝土的抗拉能力、增强混凝土的抗裂性和耐久性^[8-16],延长结构的使用寿命。目前国内 PVA 纤维混凝土多数为日本产,因其产量低且需进口,价格居高不下。关于国产 PVA 纤维早期抗裂和收缩性能的研究较少,本文通过改变纤维长度和掺量对纤维混凝土的早期抗裂性能和干燥收缩性能进行研究,为 PVA 纤维的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料及混凝土配合比

试验采用 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,矿物掺和料采用 II 级粉煤灰;细骨料采用中砂,粗骨料采用粒径在 5.0 mm ~ 31.5 mm 之间的石子;减水剂采用聚羧酸减水剂;试验拌合用水为自来水。试样的水胶比为 0.37,水泥、粉煤灰、砂和石子的用量分别为 353 kg/m³、67 kg/m³、712 kg/m³ 和 1 068 kg/m³,减水剂用量为 42 kg,纤维混凝土的纤维体积掺量为 0.9%、1.2% 和 1.6%。

国产 PVA 纤维选用内蒙古双欣高分子材料技术研究院有限公司生产的高强高弹纤维 SX-1,纤维长度为 8 mm 和 12 mm,直径为 0.015 mm,密度为 1.2 g/cm³,弹性模量为 42 GPa,断裂伸长率为 7%,抗拉强度为 1 600 MPa。

试验分组编号为 C-L- ω ,其中,C 为混凝土试件,L 为纤维长度, ω 为纤维掺量。例如,掺加纤维长度 8 mm、纤维掺量 0.9% 的 PVA 纤维混凝土试件编号为 C-8-0.9,其他试验与组别同理,普通混凝土试件编号为 PC。

1.2 试件制备

早期抗裂性能对比试验参照《纤维混凝土试验方法标准》^[17](CECS13:2009)进行,试件尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 60 mm,混凝土浇筑进模具

后,在 24 h 内测量裂缝,裂缝长度取两端直线距离,精确到 5 mm。裂缝宽度取裂缝最大宽度,使用裂缝显微镜测量,精确到 0.01 mm。

干燥收缩试验参照规范接触法进行,采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm 的棱柱体试件,测量混凝土试件浇筑后自然养护至 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d、56 d、90 d 相应龄期所产生的收缩值。

2 试验结果与分析

2.1 裂缝形态分析

PVA 纤维混凝土早期开裂裂缝形态如图 1 所示,其中(a)为 8 mm 纤维组,(b)为 12 mm 纤维组。图 2 为普通混凝土早期开裂裂缝形态。普通混凝土组和 8 mm 组试件的裂缝中,有部分裂缝分布在试件中央,且发展方向各异。12 mm 组试件的裂缝均全部或部分与试件约束方向垂直,主要分布在试件边缘,此类裂缝可以认为均由栓钉诱发而成,12 mm PVA 纤维的掺加提升了混凝土试件的开裂阈值。早期裂缝参数见表 1。

试件中出现了数根长裂缝,例如 PC 组 14 号裂缝、C-8-1.2 组 6 号裂缝、C-12-1.2 组 4 号裂缝、C-12-1.6 组 3 号裂缝,它们呈现出多处各自发展的短裂缝相连接与合流的趋势,转折较为生硬,在很小的区域内产生具明显棱角的转折。裂缝都是向着结构最脆弱处发展的,而两条不同起源、长度较短、发展方向没有发生过变化的短直裂缝趋向同一片区域,可以说明该区域是混凝土的薄弱区域,其内部可能因结构密实性差、均匀性差而储存了大量等待释放的断裂能。试件上呈“彡”型分布的微小的纺锤形裂隙,为混凝土初开裂的形态,当这些裂隙发展、连接为裂缝时,同样会合流为一条具有分支的长裂缝。

表 1 PVA 纤维混凝土的早期裂缝参数

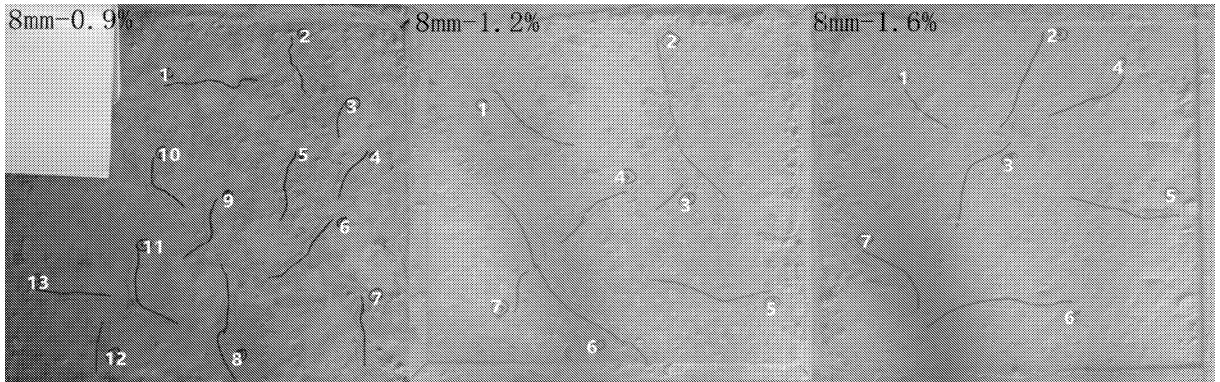
试件编号	裂缝数量	最大裂缝长度/mm	最大裂缝宽度/mm	试件裂缝名义面积/mm ²	单位面积总开裂面积/%	裂缝降低系数
PC	16	560	0.26	637.6	318.8	0.00
C-8-0.9	13	370	0.24	277.4	138.7	0.51
C-8-1.2	7	360	0.24	256.6	128.3	0.55
C-8-1.6	7	310	0.22	237.2	118.6	0.58
C-12-0.9	7	330	0.26	214.6	107.3	0.62
C-12-1.2	5	400	0.30	177.4	88.7	0.69
C-12-1.6	5	500	0.30	150.4	75.2	0.74

长裂缝的第二种成因是短裂缝的持续发展,即

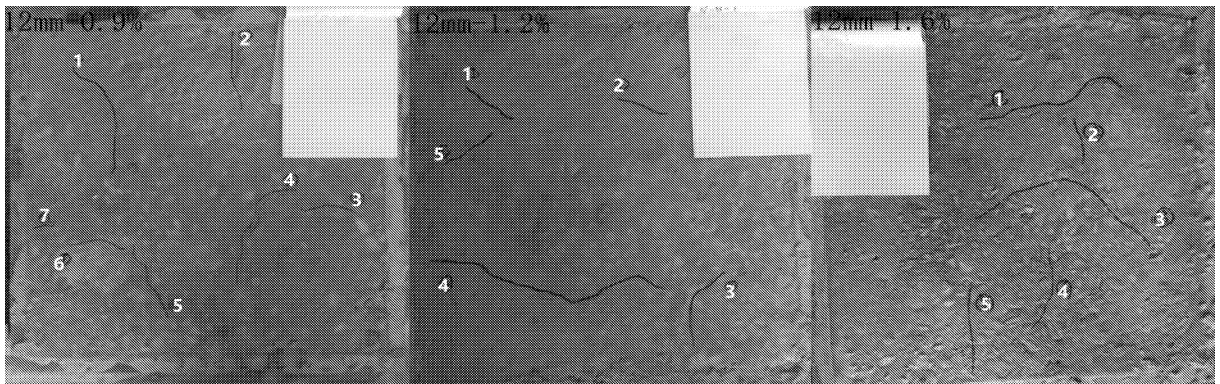
短裂缝在发展过程中,不断抵达混凝土内部的应力

集中区域,引起该区域开裂、释放能量,并利用被释放出的能量继续发展。这种长裂缝形态上的特征比较明显:转折较为平缓、没有明显的棱角,但是转折处裂缝宽度大幅增加,将裂缝扩展为裂口。例如 C

-12-1.2 组的 4 号裂缝,在试件边缘起的第二个转折处,裂缝宽度骤增,达到了该组试件的最大裂缝宽度 0.3 mm。同时,在第三个转折处裂缝宽度也达到了 0.29 mm。



(a) 8 mm 组试件



(b) 12 mm 组试件

图 1 PVA 纤维混凝土早期开裂裂缝形态

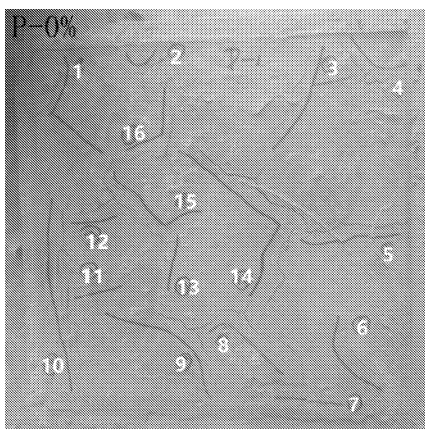


图 2 普通混凝土早期开裂裂缝形态

2.2 裂缝长度与宽度分析

C-8-0.9 的最大裂缝长度为 370 mm, 相比 PC 下降了 33.9%, 最大裂缝宽度同样从 0.26 mm 下降到 0.24 mm。C-8-1.2 的最大裂缝长度为

360 mm, 最大裂缝宽度依旧小于 PC。C-8-1.6 的最大裂缝长度为 310 mm, 相比 PC 下降了 44.6%, 最大裂缝宽度也仅为 0.22 mm。总体来说, 随着纤维掺量的增加, 最大裂缝长度和最大裂缝宽度均呈现减小的趋势, C-8-1.6 表现出了最优的控制裂缝长度、宽度发展的性能。

C-12-0.9 的最大裂缝长度为 330 mm, 相比 PC 下降了 41%, 最大裂缝宽度为 0.26 mm, 与 PC 相同。而 C-12-1.2 和 C-12-1.6 的最大裂缝长度相比 C-12-0.9 反而开始增长, 分别为 400 mm 和 500 mm, 最大裂缝宽度也随之增加到 0.3 mm, 恢复到了 PC 的水平。总体来说, C-12 组内, 随着纤维掺量的增加, 最大裂缝长度呈现先减小后增加的趋势, 而最大裂缝宽度则出现了增长的现象。

以上数据分析说明在混凝土中掺加 8 mm PVA 纤维比掺加 12 mm PVA 纤维能更好地控制裂缝长度。同时, 纤维混凝土的优势之一是控制裂缝长度

和宽度,裂缝越细,代表纤维对混凝土阻裂能力的提升越大,对混凝土耐久性的提升也越大,即掺加 8 mm PVA 纤维相比掺加 12 mm 对更有助于提升混凝土的耐久性。

2.3 单位面积上的总开裂面积与裂缝降低系数

不同纤维长度和掺量的 PVA 纤维混凝土单位面积上的总开裂面积和裂缝降低系数如图 3 所示。

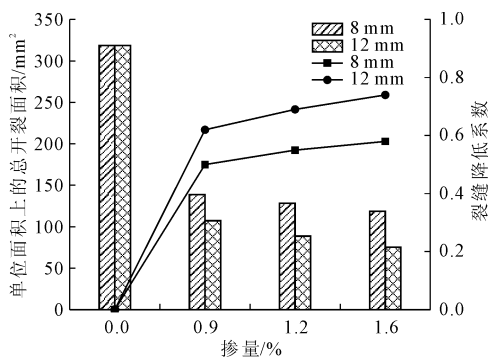


图 3 PVA 纤维混凝土总开裂面积和裂缝降低系数

随着纤维掺量的增加,C-8 组和 C-12 组的 PVA 纤维混凝土单位面积上的总开裂面积均呈现下降趋势,在掺加 PVA 纤维后,单位面积上的总开裂面积迅速下降到 138.7 mm^2 ,裂缝降低系数达到 51%,充分说明了 PVA 纤维的掺加对控制混凝土早期开裂的显著效果。随着掺量的增加,单位面积上的总开裂面积虽然仍在降低但降速有所减小,裂缝降低系数曲线同样趋于水平,这说明更多纤维的掺加对抗裂性能的提升并不明显,掺量对抗裂性能的影响不大。另一方面,各纤维掺量组的裂缝降低系数都表现出 12 mm 组高于 8 mm 组的趋势,并且随着掺量的增加,这种差距越来越大。总体来说,纤维的掺加对混凝土早期抗裂性能提升巨大,但这种提升随着纤维长度、掺量的增加逐渐减弱。

2.4 纤维参数与裂缝面积的关系

Thomas Voigt^[18] 提出并实验证明了纤维混凝土中纤维长径比和掺量的乘积与纤维混凝土开裂的关系。设纤维长径比与掺量百分比的乘积为参数 L ,表 2 列出了各组试验的参数 L 、裂缝名义总面积与裂缝平均名义面积,图 4 为其关系曲线。

结合图表可以看出,在掺加不同长度纤维的 PVA 纤维混凝土中,裂缝名义总面积随着 L 值的增加而减少。但是,除 $L=4.80$ (即掺加 8 mm PVA 纤维,掺量为 0.9%) 组的裂缝平均名义面积明显较小外,其他组没有明显区别,在 L 值继续增大后甚至有

所回升。

表 2 各组试验参数、裂缝名义总面积、裂缝平均名义面积

纤维长度 /mm	参数 L	裂缝名义总面积 /mm ²	裂缝平均名义面积 /mm ²
0	0.00	637.6	39.85
	4.80	277.4	21.34
8	6.40	256.6	36.66
	8.53	237.2	33.88
	7.20	214.6	30.66
12	9.60	177.4	35.48
	12.80	150.4	30.08

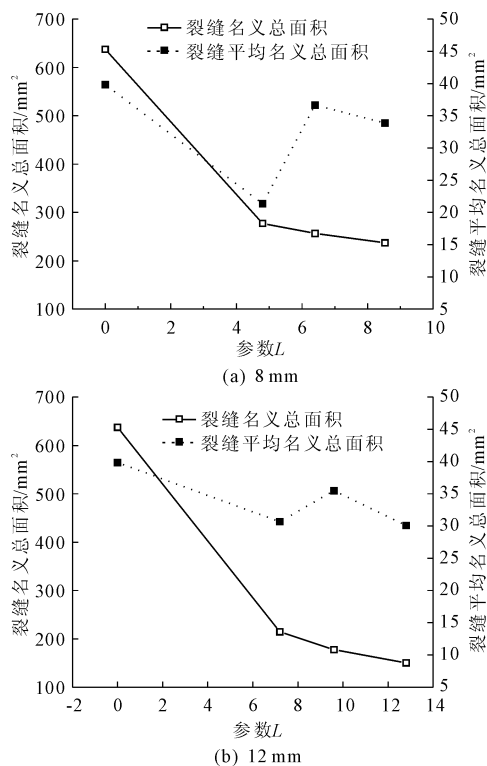


图 4 参数 L 与裂缝名义总面积和裂缝平均名义面积的关系曲线

结合裂缝形态及开裂趋势的分析,可以认为是较小的裂缝合并成为大裂缝,使裂缝数量减少,使 PVA 纤维混凝土试件在总开裂面积降低的同时,每根裂缝的平均面积保持在一定的水平。

不论是增加纤维长度或是增加纤维掺量,都可以降低 PVA 纤维混凝土早期开裂的裂缝名义总面积,即提高早期抗裂性能,但是在当 L 值超出一定值后,继续添加纤维无法继续改善纤维混凝土单根裂缝的尺寸或形态,同时可能会使小裂缝发展为大裂缝,进一步削弱纤维混凝土早期抗裂性能。

2.5 机理分析

新浇筑的混凝土在 3 h ~ 12 h 内处于塑性阶段,当表面失水速率大于内部水分迁移速率时,混凝土内部的毛细管失压,混凝土开始收缩硬化并产生细微裂缝。PVA 纤维的掺加改善了混凝土的流变性和均质性,有效阻隔了水分的溢出。纤维与纤维、纤维与骨料之间相互错位交织形成了复杂致密的三维乱向骨架,有效阻止了内部微裂缝的发展,纤维的桥梁作用起到了传递荷载的作用,使得微裂缝尖端的应力集中得到释放,削减了应力集中区域,使混凝土内部的应力场均匀。另一方面,纤维的掺加也使得混凝土裂缝需要更多的能量才能继续扩展,这就有效抑制了裂缝长度的发展。当掺加的 PVA 纤维为 12 mm 时,虽然裂缝降低系数和限裂效能等级比 8 mm 纤维表现优异,但加入过长过多的 PVA 纤维不利于纤维在混凝土内部均匀分散,甚至有可能在内部结团,出现应力集中区域。裂缝一旦出现便有可能受应力集中区域的诱使发展为长裂缝。同时,纤维的结团行为降低了桥梁作用,削弱了纤维控制裂缝宽度的能力。这使得掺加 12 mm PVA 纤维组的最大裂缝长度随掺量逐渐增加甚至接近普通混凝土,最大裂缝宽度超过了普通混凝土。

2.6 干燥收缩性能

图 5 为 PVA 纤维混凝土累积收缩值。当掺加纤维长度较小且掺量较少时,即纤维长度为 8 mm、纤维掺量为 0.9% 时,纤维可以很好的发挥自身特性:传递应力以减少混凝土内的应力集中区域,利用纤维与基体界面的黏结力和机械摩擦力桥接混凝土基体,提升混凝土的抗干燥收缩性能。

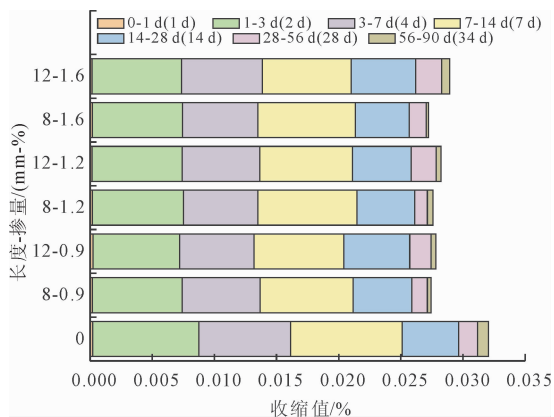


图 5 PVA 纤维混凝土累积收缩值

当纤维掺量提升至 1.6% 时,由图 5 可知,混凝

土在 56 d ~ 90 d 期间的收缩值相比纤维掺量 0.9% 时有所下降,但是下降量有限。由此可知,掺加 8 mm PVA 纤维可以有效提升混凝土的抗干燥收缩性能,但是纤维掺量的进一步提升带来的性能提升较小。当掺加 PVA 纤维长度为 12 mm 时,混凝土各阶段收缩值均明显大于同掺量的 8 mm 纤维混凝土,可以认为 8 mm PVA 纤维对混凝土抗干燥收缩能力的提升是几乎作用于干燥收缩全阶段的。

对比掺加 12 mm PVA 纤维的混凝土干燥收缩数据可知,收缩值为 0.9% 组 < 1.2% 组 < 1.6% 组,随着纤维掺量的增加而增加。可以看出,12 mm PVA 纤维的掺加也可以提升混凝土的抗干燥收缩性能,但随着纤维掺量的提升,12 mm 纤维混凝土抗干燥收缩性能逐渐下降。12 mm 纤维在混凝土基体内起阻裂作用的原理与 8 mm 纤维相同,但是因 12 mm 纤维长度较大,其搭建的三维乱向骨架中留出的孔隙较粗,水分更容易从其中逸散。同时,因为这些孔隙尺寸相比 8 mm 纤维混凝土的孔隙尺寸仅有少量增加,使这些孔隙依然属于毛细孔隙,所以依然能保持一定程度上的阻裂能力。因为这些孔隙自纤维混凝土浇筑时便已存在,所以在每一段干燥收缩试验周期内,8 mm PVA 纤维混凝土对混凝土抗干燥收缩能力的提升都是优于 12 mm PVA 纤维混凝土的,这些微小的优势随着时间的发展累积,在长期的干燥收缩过程中会累积为较大的性能优势。

3 结 论

(1) 掺加国产 PVA 纤维可以显著提升混凝土的早期抗裂性能,裂缝降低系数均大于 0.5。随着纤维掺量的增加,裂缝数量减少、名义开裂面积减小,且裂缝分布集中在模具边缘的预制栓钉附近。

(2) PVA 纤维的掺加对混凝土早期抗裂性能提升巨大,混凝土中掺加 8 mm 长度 PVA 纤维比掺加 12 mm PVA 纤维能更好地控制裂缝长度,呈现出随着纤维长度、掺量的增加逐渐减弱的趋势。纤维的掺加使得混凝土裂缝需要更多能量才能继续扩展,有效抑制了裂缝的发展。

(3) PVA 纤维的掺加对混凝土抗干燥收缩能力的提升体现在整个干燥收缩阶段,并且 8 mm PVA 纤维对混凝土抗干燥收缩能力的提升优于 12 mm PVA 纤维,而纤维掺量的进一步增加带来的性能提升较小。在龄期达到 90 d 后时,掺加 PVA 纤

维的混凝土收缩值已经几乎可以忽略不计,普通混凝土的收缩值依然明显。

参考文献:

- [1] 彭定超,袁勇. PVA纤维混凝土弯折试验研究[J]. 混凝土,2004(1):46-51.
- [2] 袁勇,彭定超,邵晓芸. PVA纤维混凝土梁裂缝实验分析[J]. 工业建筑,2002,32(11):5-7.
- [3] 彭定超,袁勇. PVA纤维混凝土力学参数间的相关关系[J]. 纤维复合材料,2003(4):25-29.
- [4] Qi C, Weiss J, Olek J. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function[J]. Materials and Structures,2003,36:386-395.
- [5] Sivakumar A, Santhanam M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2007,29(7):575-581.
- [6] 邢通. 混杂纤维混凝土早龄期抗裂性能试验研究[J]. 华北水利水电学院学报,2013,31(1):50-53.
- [7] 唐明,傅柏权,张威. 聚丙烯纤维混凝土早期塑性开裂特症及分形评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(4):602-605,614.
- [8] 邓宗才,薛会青,李朋远. PVA纤维增强混凝土的弯曲韧性[J]. 南水北调与水利科技,2007,5(5):139-141.
- [9] 姜睿,徐世焯,贾金青. 高轴压比PVA纤维超高强混凝土短柱延性的试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(8):54-60.
- [10] 张鹏. PVA纤维混凝土弯曲韧性和动态压缩性能试验研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2014.
- [11] Shafiq N, Ayub T, Khan S U. Investigating the performance of PVA and basalt fibre reinforced beams subjected to flexural action[J]. Composite Structures, 2016,153:30-41.
- [12] 林辉. 掺PVA纤维混凝土的力学及变形性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [13] 林水东,程贤甦,林志忠. PP和PVA纤维对水泥砂浆抗裂和强度性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2005,141(1):43-45.
- [14] 田砾,朱桂红,郭平功,等. PVA纤维增强应变硬化水泥基材料韧性性能研究[J]. 建筑科学,2006,22(5A):47-49,34.
- [15] 杨付权,胡秋生,黄崇波. 聚乙烯醇纤维混凝土在体育场看台面的施工应用[J]. 建筑施工,2006,28(8):636-637.
- [16] 汪卫,潘钻峰,孟少平,等. 国产PVA纤维增强混凝土基复合材料力学性能研究[J]. 工业建筑,2014,44(S1):958-964.
- [17] 纤维混凝土试验方法标准:CECS13:2009[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
- [18] Bui V K, Voigt T, Shah S P. Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded-wire fabric[J]. ACI Materials Journal, 2004,101(3):233-241.

智慧水利专业招生快讯

热烈祝贺西北农林科技大学水利与建筑工程学院智慧水利专业获国家教育部批准。

2022年,全国共有31个新增本科专业被纳入高校本科招生计划,西北农林科技大学智慧水利专业入选。智慧水利专业是西北农林科技大学首次申报设立的新工科专业,2022年全国率先招生。智慧水利专业服务现代水利事业发展,适应水利新业态、新趋势,结合社会经济发展对水利人才需求的新变化,以及云计算、物联网、大数据、人工智能等新技术为水利学科发展带来的机遇与挑战,以智慧水务、智慧灌区建设为特色,面向水利工程智慧设计、智能工程建造和智慧水管理等行业需求,培养复合型、创新型高水平技术人才。本专业学生毕业后,能够迅速成长为智慧水利及相关领域的学术、技术或管理骨干。