

[文章编号] 1003—4684(2021)02-0095-04

纤维掺量对超高韧性混凝土受弯性能的影响

文 韬, 姜久红, 王云飞

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 通过 3 组不同掺量的改性 PP(聚丙烯)纤维超高韧性混凝土的四点抗折实验,研究了不同掺量的改性 PP 纤维对超高韧性混凝土受弯性能的影响,研究表明:当纤维含量较低时没有足够的纤维支撑整体材料的拉应力,且改性 PP 纤维掺入量与混凝土抗折性能成正比;纤维掺量由 1%、2% 到 3%,抗折强度明显增加,纤维掺量超过 3% 时抗折强度开始降低;较普通混凝土抗折强度提升了 184%~254%。通过改性工艺提高 PP 纤维与胶凝材料的粘结力,减少了裂纹的产生,大幅提高了混凝土的抗折强度。由于其较为廉价的制作成本和较高的力学响应,可大范围生产使用。

[关键词] 超高韧性混凝土; 改性聚丙烯纤维; 抗折强度; 粘结力

[中图分类号] TU528.572 [文献标识码] A

19 世纪 20 年代硅酸盐水泥横空出世,混凝土以骨料取材的多样性、其构件成形速度快等优点,在我国很多地区多个方面运用极广,但混凝土的抗拉强度低,韧性差,不易受拉,限制着它的应用。为了改变这一现象,一种抗拉强度高、韧性强、开裂后裂纹宽度容易控制的增强混凝土便应运而生,为了进一步强化混凝土材料的韧性和强度,高掺量的高韧性纤维混凝土在近年被广泛研究。

高延性水泥基复合材料英文名为“Engineered Cementitious Composite”,缩写为 ECC。1992 年由密歇根大学的 Li.V.C 教授^[1-2]采取细观力学和断裂力学的基本原理提出了这种材料的基本设计理念。2009 年 2 月国际知名杂志 Forbes 对 PVA(聚乙烯醇)ECC 进行了专题报道,引起了广大学者的高度认可,被认为将会引起新型混凝土材料产业化革命。但高额的价格制约了 PVA ECC 的产业化之路,在我国的土木工程应用当中,PVA 纤维主要进口于日本宝可丽公司,价格昂贵并且制作工艺难以与厂家沟通,而国内 PP(聚丙烯)纤维生产厂家众多,制作工艺相对成熟,每公斤价格仅为 PVA 的 1/8。2000 年前后,掺有改性 PP 纤维的高韧性纤维混凝土在全球各地大放异彩。美国将聚丙烯纤维大量应用于道路建设当中,采用纤维混凝土铺成的路面,叫做白色路面,简称 UTW。1991 年,美国肯塔基州路易斯维尔市采用 UTW 工艺修建的公路解决了沥青路面需要无限修补的问题。同时聚丙烯混凝土也广泛运用

于桥梁工程当中,由交通部第二公路局承建的西安市环城大型立交桥采用了聚丙烯纤维,解决了桥面混凝土易产生裂纹的难题。2000 年,宁波白溪水库也采用了聚丙烯纤维混凝土浇筑面板坝,以提高抗冲击力和耐磨能力。

本次实验采用表面粗糙化、Y 字口截面的改性 PP 纤维,通过增加其表面性能和粗糙度,继而提高改性 PP 纤维与水泥基材料的化学结合能力,制作的超强韧性改性 PP 混凝土(HDPFC)与普通混凝土相比,其抗折强度和抗冲击等力学性能极大提高。由于改性 PP 纤维价格只有 PVA 的 1/8,使得 HD-PFC 可在土木工程中大范围使用。目前国际上关于 PP ECC 的研究仅俞家欢^[3]和 LI V C^[4]曾有提及。

1 改性 PP 纤维掺量对混凝土的增强机理分析

根据英国的 Swamy 和 Naman 提出的复合力学模型理论,在分析改性 PP 纤维含量对混凝土的增强机理时,将采取复合力学模型进行分析:将纤维混凝土看作各向同性材料,整体由混凝土和纤维两部分组成。假设:1)不考虑改性 PP 纤维与混凝土材料之间的相对侧移;2)假设内部改性 PP 纤维分布均匀且方向与受力方向保持一致;3)不考虑混凝土和改性 PP 纤维的塑形变形,将其看作弹性材料。

根据弹性叠加原理:

[收稿日期] 2020—10—25

[第一作者] 文 韬(1996—),男,湖北宜昌人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为超高韧性纤维混凝土

[通信作者] 姜久红(1969—),女,吉林伊通人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为结构动力学

$$F_{fc} = F_c + F_m$$

其中： F_{fc} 为改性 PP 纤维混凝土所受的力， $F_{fc} = \sigma_{fc}A_{fc}$ ； F_f 为改性 PP 纤维所受的力， $F_f = \sigma_fA_f$ ； F_m 为混凝土所受的力， $F_m = \sigma_mA_m$ ；

可得(单位体积下横截面的比值近似等效于体积率)

$$\sigma_{fc}A_{fc} = \sigma_fA_f + \sigma_mA_m \tag{1}$$

式(1)中两边同除以 A_{fc} 即改性 PP 纤维混凝土的横截面积,可得

$$\sigma_{fc} = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m$$

其中： v_f 为改性 PP 纤维体积率， v_m 为混凝土体积率。

改性 PP 纤维混凝土弹性模量 E_{fc} 是应力 σ 对应变 ϵ 的一阶导数

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{fc}}{d\epsilon_{fc}} &= \frac{\partial(\sigma_f v_f)}{\partial \sigma_f} \frac{d\sigma_f}{d\epsilon_{fc}} + \frac{\partial(\sigma_f v_f)}{\partial \sigma_f} \frac{dv_f}{d\epsilon_{fc}} + \\ &\frac{\partial(\sigma_m v_m)}{\partial \sigma_m} \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_{fc}} + \frac{\partial(\sigma_m v_m)}{\partial \sigma_m} \frac{dv_m}{d\epsilon_{fc}} \\ &= v_f \frac{d\sigma_f}{d\epsilon_{fc}} + \sigma_f \frac{dv_f}{d\epsilon_{fc}} + v_m \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_{fc}} + \sigma_m \frac{dv_m}{d\epsilon_{fc}} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{dv_f}{d\epsilon_{fc}} &= 0, \frac{dv_m}{d\epsilon_{fc}} = 0; \\ d\epsilon_{fc} &= d\epsilon_f = d\epsilon_m; \end{aligned}$$

$$\frac{d\sigma_{fc}}{d\epsilon_{fc}} = v_f \frac{d\sigma_f}{d\epsilon_{fc}} + v_m \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_m}$$

得

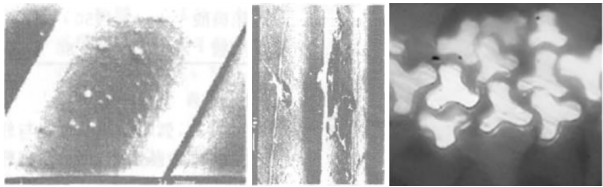
$$\begin{aligned} E_{fc} &= E_f v_f + E_m v_m \\ \Rightarrow E_{fc} &= E_f v_f + E_m (1 - v_f) \end{aligned} \tag{2}$$

由式(2)可见,在应变相同的情况下,改性 PP 纤维混凝土中的改性 PP 纤维的应力与混凝土应力的比值等同于两者的弹性模量的比。因此得出结论:当改性 PP 纤维含量较低时,没有足量的纤维来承受整体材料的拉应力,增加纤维掺量可解决这个问题。

2 试验概况

2.1 试验选材

本试验中超高延性改性 PP 纤维混凝土的组成材料包括:PO 42.5 水泥,一级粉煤灰直径 0.1~0.2 mm 的精细石英砂、普通自来水、聚羧酸高效减水剂、改性 PP 纤维中主要的 Y 字口截面改性 PP 纤维,在不改变纤维的拉伸强度和韧性的前提下使得纤维表面粗糙化,提高改性 PP 纤维与水泥基材料的化学结合能。Fu XuLi^[5] 等研究表明,未经处理的 PP 纤维与水的接触角为 112.5°,经过酸碱表面粗糙化处理过的接触角为 78.1°和 82.2°,即通过表面粗糙化处理的 PP 纤维被水浸湿的程度大幅提升。其与普通 PP 纤维细观差异如图 1 所示。



(a) 糙化前 (b) 糙化后 (c) 纤维Y字截面

图 1 纤维经表面粗糙化处理的 SEM 照片对比

从图 1 可知,经处理后的 PP 纤维表面的粗糙程度大幅增加,更易与水泥基材料及水结合。如图 2 中的纤维经搅拌后乱向分布,其 Y 字截面更易贴合水泥基材料。PP 纤维的基本性能如表 1 所示。

表 1 PP 纤维性能参数

型号	ZLN001	拉伸强度/MPa	300
直径/um	35	延伸率/%	4
长度/mm	6	弹性模量/MPa	3793

2.2 配合比

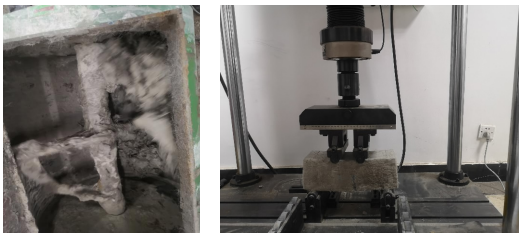
邓明科^[6-7] 等人的研究表示高延性混凝土的 PVA 含量 2%,水胶比在 0.27 左右时,试件呈现较好的弯曲性能。但改性 PP 纤维不同于 PVA 纤维,根据俞家欢^[8] 团队的研究,PP 纤维含量在 3%左右时其性能最佳,故取改性 PP 纤维含量 0;2%;3%;4%,水胶比 0.29 制成试件。配合比如表 2。

表 2 超高韧性改性 PP 纤维混凝土配合比

序号	水胶比	改性 PP 纤维掺量 %	粉煤灰掺量 %	砂胶比
A1	0.29	0	50	0.362
B1	0.29	2	50	0.363
B2	0.29	3	50	0.363
B3	0.29	4	50	0.363

2.3 试件制作

参考我国 CECS 13 : 2009《纤维混凝土试验方法标准》^[9] 及日本 JSCE SF4^[10] 标准中受弯韧性试验的规定,制作每组 3 个尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体受弯试件;材料使用强制式混凝土搅拌机搅拌,材料制作时采用“后掺纤维法”制备,在保证纤维的分散相对均匀的前提下,每组试件搅拌的时间基本一致,尽量减少搅拌时间对试件的影响,且所有试件均在同一条件下浇筑、养护。加载时试件龄期为 49 d。制作过程如图 2 所示。



(a) 搅拌过程 (b) 四点抗折实验

图 2 试件的制备实验过程

3 试验结果及分析

3.1 试验现象

在实验的过程中可以直观地看到纤维对试件的增强效果,在做四点抗折的实验中,随着荷载的不断加大,可以清楚听到纤维拉断的吱吱声,特别是 B2 和 B3 的纤维含量较高,纤维含量的增大对试件的受弯机制和裂缝发展机制有较为明显影响。

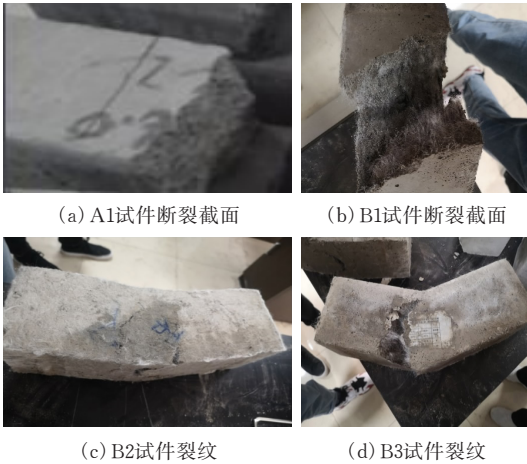


图 3 四种试件破坏断口裂纹图

B1 组改性 PP 纤维含量为 2%,在加载的初期,由于其较低的纤维含量,当试件出现第一条裂缝时只能听见很细微的纤维被拉断的声音,跨中变形较小;随着荷载不断增大,裂纹呈纵向延伸;加载到峰值之后,裂缝宽度开始呈锥形延伸,最终破坏时试件开裂为一条或者多条。最终发展形态如图 3b 所示。

B2 和 B3 这种纤维含量为 3%以上的试件,在加载初期未有明显变化,随着荷载不断增大,第一条裂缝开始出现,此时能明显听见纤维被拉断的“吡吡”声,第一道裂纹没有立马延伸,而是在跨中裂缝旁边延伸出第二条裂缝;当加载到峰值时,跨中裂缝没有明显变化,第二条裂缝开始延倾斜角发展,通过内部纤维被不断拔出散发能量,试件呈现出较大挠度但未明显破坏,具有极好的延伸性。最终发展形态如图 3c、d 所示。由理论研究可知,改性 PP 纤维的应力与混凝土应力的比值等同于两者的弹性模量的比。所以低掺量的试件中,少量的纤维无法支撑断裂时产生的巨大拉应力,而导致裂纹提前产生。而增加纤维掺量可解决这一问题。B3 试件纤维含量大于 B2,图 3c 和 d 可明确看出 B3 试件裂纹大于 B2 且 B2 试件在达到最大荷载后表现出较大的挠度,未有明显破坏,纤维掺量增加但抗折强度没有继续增加,出现拐点。根据 A1-B3 的抗折强度,进一步研究。

3.2 结果分析

从表 3 和图 4 中可以看出:随着纤维含量的增加,由于纤维在内部呈乱向桥路连接,在跨中裂缝开始初期,乱向连接的纤维不断撕裂,消耗了巨大的能量。

表 3 高延性改性 pp 纤维混凝土试件抗折强度试验结果

试件名称	纤维掺量/%	抗折强度/MPa	均值
A1-1	0	8.35	8.35
B1-1	2	15.42	—
B1-2	2	16.14	15.75
B1-3	2	15.68	—
B2-1	3	21.26	—
B2-2	3	19.22	20.34
B2-3	3	20.54	—
B3-1	4	17.45	—
B3-2	4	17.04	17.72
B3-3	4	18.66	—

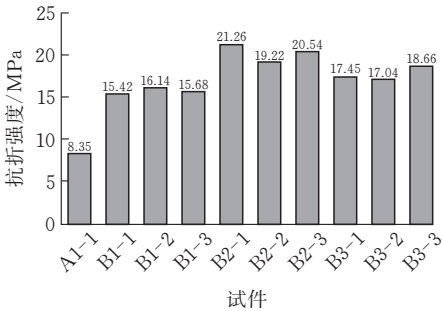


图 4 抗压强度柱状图

高纤维含量的试件除了跨中裂缝之外会在旁边延伸出第二裂缝,从而具有更高的抗折强度,并且达到最大荷载以后拥有较大的挠度。符合上面的理论研究:低掺量的纤维无法支撑断裂时产生的巨大拉应力,而导致裂纹提前产生。由于理论推导中有三个假设:忽略了纤维与混凝土材料之间的相对位移;假想纤维分布均匀并且方向与受力方向一致;认为整个纤维混凝土为塑形材料,发生弹性变形,但实际实验中发现:试件在受力时有部分纤维发生了位移被连根拔起;纤维由于掺量高,在混凝土材料里面呈乱向桥路连接,在受拉时有部分纤维分布方向不平行于受力方向且有倾斜角,横向约束力大大减小;纤维混凝土实际为纤维和混凝土材料组成的复合材料,并不是塑性材料,只有部分发生弹性变形。因此图中出现了明显拐点,纤维含量从 3%增加到 4%的过程中,抗折强度开始下降,说明并不是纤维含量越高越好,在本次实验中 3%掺量的高韧性混凝土抗折强度最高。

4 结论

通过对 3 组不同掺量的改性 PP 纤维高韧性混凝土试样抗折强度研究以及纤维增强机理分析,得

出以下结论:

- 1)纤维混凝土的抗折强度随纤维掺量增加而增大,对于纤维掺量较低的高韧性混凝土,其中少量的纤维不足以支撑断裂时产生的巨大拉应力,使得裂纹提前产生,提高纤维含量可解决这一问题。纤维掺量 3%~4%过程中混凝土的抗折强度明显减弱,在本次实验中,3%纤维含量的超高韧性改性 PP 纤维混凝土抗弯性能最佳。
- 2)通过试样断裂界面可以看出,改性 PP 纤维高韧性混凝土内部的纤维呈乱向桥路连接,使试件跨中裂缝的产生和拉伸变形受到了一定的约束,棱柱体破坏之前的抗折能力大大提升,特别是 3%纤维含量的棱柱体,在跨中裂缝产生以后,持续加载,跨中裂缝旁有第二条裂缝产生,跨中裂缝不再明显变宽,直至加载结束,棱柱体拥有较大挠度但未明显破坏,拥有良好的延伸性能。
- 3)与普通混凝土相比,高韧性改性 PP 纤维混凝土内有纤维产生的横向约束力,抗折强度提升了 184%~254%。在受弯过程中,纤维的断裂和拔出消耗了大量能量,增大了高延性改性 PP 纤维混凝土的挠度,受弯性能大大提升。

[参 考 文 献]

[1] Li V C,Leung C K Y.Steady state and multiple crack-

ing of short random fiber composites[J].Journal of Engineering Mechanics,ASCE,1992,188(11):2246-2264.

[2] Li V C,Wang S,Wu C.Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC[J].ACI Materials Journal,2001,98(6):483-492.

[3] Yu Gia Huan,The elastic field cased by two inclusions with uni-form dilatational eigenstrains in dissimilar mediA[J].Journal of Shanghai Jiaotong University,2001:32-46.

[4] Li V C.ECC-tailored composites through micromechanical modeling [C]//Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future Nontreal: Canadian Society of Civil Engineers.1998,64-97.

[5] Fu Xuli.CementandConerete Research[J].Composites Engineering,1998,28(6):783.

[6] 邓明科,秦萌,梁兴文.高延性混凝土抗压性能试件研究[J].工业建筑,2015,45(4):120-126.

[7] 邓明科,孙宏哲,梁兴文,等.延性纤维混凝土抗弯性能试件研究[J].工业建筑,2014,20(5):85-90.

[8] 俞家欢.超强韧性纤维混凝土的性能及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2012:15-155.

[9] 中国工程建设标准化协会.纤维混凝土试验方法标准:CECS13:2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[10] JSCE—SF4b Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete[S].Tokyo: JapanConcrete Institute,1984: 45-51.

An Experimental Study on the Influence of Modified PP Fiber Content on Flexural Properties of Ultra High Toughness Concrete

WEN Tao, JIANG Jiuhong, WANG Yunfei

(School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Through the four-point bending test of three groups of ultra-high toughness concrete with different content of modified PP fiber, the influence of different content of modified PP fiber on the flexural performance of ultra-high toughness concrete is studied. The results show that when the fiber content is low, there is not enough fiber to support the tensile stress of the whole material, and the content of modified PP fiber is directly proportional to the flexural performance of concrete. The flexural strength of concrete increases from 1%, 2% to 3%, and decreases when the fiber content exceeds 3%, which is 184%~254% higher than that of ordinary concrete. Through the modification process, the connection force between PP fiber and cementitious material is improved, the generation of cracks is reduced, and the flexural strength of concrete is greatly improved. Because of its low cost and high mechanical response, it can be widely used in production.

Keywords: ultra high toughness concrete; modified polypropylene fiber; flexural strength; connecting force

[责任编辑: 裴 琴]