

# 浅谈纤维混凝土

林倩<sup>1</sup>, 吴颀<sup>2</sup>

(1.厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2.厦门市建筑科学研究院集团股份有限公司, 福建 厦门 361005)

**摘要** 本文主要介绍了纤维混凝土的发展历程、增强机理和技术性能。重点列举了各种纤维混凝土的工程实例, 最后叙述了纤维混凝土存在的主要问题和目前纤维混凝土技术的研究发展方向。

**关键词** 纤维混凝土; 钢纤维混凝土; 聚丙烯纤维混凝土; 玻璃纤维混凝土; 碳纤维混凝土

**Abstract:** This paper is a general introduction of the development, strengthen mechanisms, technical performance. This paper present engineering examples of every fiber reinforced concrete, As a result, this paper focuses on the main problems of fiber reinforced concrete and the current research and development of fiber concrete technology.

**Keywords:** fiber reinforced concrete; steel fiber reinforced concrete; polypropylene fiber reinforced concrete; glass fiber reinforced concrete; carbon fiber reinforced concrete;

自 1824 年英国工匠约瑟夫·阿斯普丁发明波特兰水泥后, 水泥混凝土得到迅速发展, 经过近 190 多年的研究和应用, 混凝土已成为当今主要的一种优良建筑材料。但是, 水泥混凝土仍然存在着一个突出的缺陷, 即: 它的抗压强度虽然比较高, 但其抗拉强度、抗弯强度、抗裂强度、抗冲击韧性、抗爆等性能却比较差。纤维混凝土就是人们考虑如何改善混凝土的脆性, 提高其抗拉、抗弯、抗冲击和抗爆等力学性能的基础上发展起来的, 它具有普通混凝土所没有的许多优良性能。纤维混凝土, 又称纤维增强混凝土, 是以水泥净浆、砂浆或混凝土作为基材, 以适量的非连续的短纤维或连续的长纤维作为增强材料, 均布地掺和在混凝土中, 成为一种可浇注或可喷射的材料, 从而形成的一种新型增强建筑材料<sup>[1]</sup>。

## 1 纤维混凝土概述

### 1.1 纤维混凝土的发展历程

纤维混凝土的发展始于 20 世纪初, 其中以钢纤维混凝土研究的时间最早、应用得最广泛。早在 1910 年, 美国的 H. F. Porter 就发表了关于短钢纤维增强混凝土的第一篇论文。到了 20 世纪 40 年代, 由于军事工程的需要, 英国、美国、法国、德国等国的科学家, 先后发表了纤维混凝土的研究报告, 但这些研究报告均未能从理论上说明纤维对混凝土的增强机理, 因而限制了这种复合材料在工程结构中的推广应用。纤维混凝土真正进入应用于工程的研究, 是在 20 世纪 60 年代初期。1963 年, 美国的 J.P. Romualdi 等发表了钢纤维约束混凝土裂缝发展机理的研究报告, 首次提出了纤维的阻裂机理, 才使这种复合材料的发展有实质性的突破, 尤其钢纤维混凝土的研究和应用受到高度重视。随后, 国际标准化协会也增设了纤维增强水泥制品技术标准委员会。

20 世纪 70 年代后, 不仅钢纤维混凝土的研究发展很快, 而且碳、玻璃、石棉等高弹纤维混凝土, 尼龙、聚丙烯、植物等低弹性纤维混凝土的研制也引起了各国的关注。增强理论的广度和深度以及研究应用都取得了令人鼓舞的成果。

### 1.2 纤维混凝土的增强机理

自 1910 年纤维混凝土问世以来, 经过 100 年的不懈努力, 其增强机理才逐步发展起来。目前, 对于混凝土中均匀而任意分布的短纤维对混凝土的增强机理存在着两种不同的理论解释。其一, 为美国的 J.P. Romualdi 提出的“纤维间距机理”; 其二, 为英国的 Swamy Mamgat 等提出的“复合材料机理”<sup>[2]</sup>。

#### 1.2.1 纤维间距理论

纤维间距理论, 是根据线弹性断裂力学理论来说明纤维材料对于裂缝发生和发展的约束作用。这一机理认为: 在混凝土内部原来就存在缺陷, 欲提高这种材料的强度, 必须尽可能减小缺陷的程度、提高这种材料的韧性, 降低内部裂缝端部的应力集中系数。

根据理论推导, 得到了某一截面对应力有效的平均间距计算公式:

$$\bar{S} = \frac{1}{\sqrt{n}} = 1.38d\sqrt{\frac{V}{V_x}} = 13.8d\sqrt{\frac{1}{P}}$$

S 为某一截面纤维的平均间距; d 为纤维的直径; P 为纤维体积百分率; V 为纤维混凝土的体积;  $V_x$  为单位体积内的纤维体积。

由于纤维间距机理假定, 纤维和基体间的黏结是完美无缺的。但是, 事实却不尽如此, 它们之间的黏结肯定有薄弱之处。因而还不能客观地反映纤维增强的机理。

#### 1.2.2 复合材料机理

复合材料机理的理论出发点是复合材料构成的复合原理。将纤维混凝土看做是纤维强化体系, 并应用混合原理来推定纤维混凝土的抗拉和抗弯强度。

在基体和纤维完全黏结的条件下, 并在基体和连续纤维构成的复合体上施加拉伸力时, 该复合体强度是由纤维和基体的体积比和应力所决定。用公式可表达为:

$$f_{xL} = f_{JL} \frac{V_J}{V} + \sigma_x \frac{V_x}{V} = f_{JL} V_J + \sigma_x V_x$$

式中  $f_{tL}, f_{tR}$  分别为纤维混凝土和基体的抗拉强度,  $\sigma_x$  为纤维混凝土达到抗拉强度时纤维的拉应力;  $V_f, V_c$  为单位体积内的基体体积和纤维体积,  $V_f + V_c = V$ 。

但复合材料理论同时也存在其不足之处,其忽略了纤维对基体的阻裂作用,即忽略了复合带来的耦合效应。

### 1.3 纤维混凝土的技术性能

表1 普通混凝土、钢纤维混凝土的抗压与抗折强度对比

混凝土名称	配合比	水:水泥:砂:石	减水剂/%	R28 抗折强度/MPa	R28 抗压强度/MPa
普通水泥混凝土	190:420:573:1407		0.8	5.07	40.2
钢纤维混凝土	220:490:558:1132		0.8	6.54	43.4

纤维混凝土中乱向分布的纤维主要作用是阻碍混凝土内部微裂缝的扩展和阻滞宏观裂缝的发生和发展。在受荷(拉、弯)初期,水泥基料与纤维共同承受外力,当混凝土开裂后,横跨裂缝的纤维成为外力的主要承受者。因此纤维混凝土与普通混凝土相比具有一系列优越的物理和力学性能<sup>[3]</sup>。

#### 1.3.1 强度和重量比值大

纤维混凝土的强度重量比值大,这是纤维混凝土具有优越经济性的重要标志。在混凝土中掺入适量纤维,其抗拉强度提高25%~50%,抗弯强度提高40%~80%,抗剪强度提高50%~100%。因此,纤维混凝土具有较高的抗拉、抗弯、抗剪和抗扭强度。

#### 1.3.2 卓越的抗冲击性能

材料抵抗冲击或震动荷载作用的性能,称为冲击韧性,在通常的纤维掺量下,冲击抗压韧性可提高2~7倍,冲击抗弯、抗拉等韧性可提高几倍到几十倍。所以,纤维混凝土具有卓越的抗冲击性能。

#### 1.3.3 收缩性能改善

在通常的纤维掺量下,纤维混凝土较普通混凝土的收缩值降低7%~9%。因此,纤维混凝土的收缩性能明显改善。

#### 1.3.4 抗疲劳性能显著提高

纤维混凝土的抗弯和抗压疲劳性能比普通混凝土都有较大改善。当掺有1.5%纤维抗弯疲劳寿命为 $1 \times 10^6$ 次时,应力比为0.68,而普通混凝土仅为0.51;当掺有2%纤维混凝土抗压疲劳寿命达 $2 \times 10^6$ 次时,应力比为0.92,而普通混凝土仅为0.56。所以,纤维混凝土的抗疲劳性能显著提高。

## 2 各种纤维混凝土工程实例

### 2.1 钢纤维混凝土工程实例

山东省平阴黄河公路大桥,建于1969年,全长963.52m [ $3 \times 33 + (96 + 112 + 96) + (96 + 112 + 96) + 7 \times 33$ ]。主桥上部结构为两联(96+112+96)m三跨连续栓焊钢桁引桥,上部结构为单跨标准跨径为33m的预应力混凝土工字梁与钢筋混凝土行车道板组成的迭合式组合梁。原设计荷载为:汽-13,挂-60。经过多年使用,早桥出现多处病害之一是桥面铺装损坏严重。为提高桥梁的技术状况,延长桥梁的使用寿命,加固的设计荷载提高为汽-20,挂-100。加固维修桥面铺装的方法就是洗刨旧桥混凝土,改用钢纤维混凝土桥面铺装。滑模摊铺双钢筋混凝土桥面的优势除了上述各项性能和耐久性提高以外,

桥面的平整度特别优异,能够达到动态平整度1.0的水平<sup>[5]</sup>。

在桥面铺装施工过程中进行现场取样试验,经过28d养护,测试得出普通混凝土、钢纤维混凝土的抗压与抗折强度。通过钻孔取芯进行劈拉试验,钢纤维混凝土比普通混凝土的抗折强度提高28.99%,抗压强度仅提高了8%。

通过对试验路半年通车试验的调查分析,无明显断板、

开裂等现象。由此可见,采用钢纤维混凝土路面,确实收到了良好的使用效果。

### 2.2 聚丙烯纤维混凝土工程实例

陕西宝鸡法门寺舍利塔工程为钢骨砼双向折线往复倾斜双塔体结构,高度147m,建筑面积7万 $m^2$ ,塔身分11层,在+54m第4层处,设计有18m球冠状穹顶结构,穹顶壳体砼厚度为0.2m,球冠上部由3道环梁和8根弧形I字钢梁与壳体连在一起。原施工方案采用支设内外双层模板,浇筑大流动性砼,由于楼面结构十分复杂,上层模板的安装及拆除十分困难,支拆模费用将大大增加,室内狭小砼浇筑质量也难以保证。经试验和研究后决定采用低坍落度泵送聚丙烯纤维砼<sup>[7]</sup>,利用聚丙烯纤维在砼中的增稠效应,取消上层模板,一次浇筑成形的施工方案。于2007年10月23日成功完成了垂直泵送54m穹顶施工任务,效果良好。

### 2.3 玻璃纤维混凝土工程实例

上海世博会法国馆是一个网格交错的四方形建筑,该建筑外表的白色混凝土网格,使用的是一种叫玻璃纤维加强混凝土的新材料。这种混凝土网格,不仅有防风、抗震的效果,抗压能力、弯曲度等属性也比一般的混凝土要好许多。而且,除了对建筑结构有所加强之外,这层光滑透薄的白色表皮还方便装饰,能够增强建筑物外墙的审美表现力。

### 2.4 碳纤维混凝土工程实例

1986年日本东京的ARK大厦一次使用碳纤维混凝土幕墙板(碳纤维3%)32000 $m^2$ ,每块的尺寸为1147m $\times$ 3176m。可承受63MPa的风压,外墙减轻了40%的重量,使大楼钢架的重量减轻400t,在使用中,表现出良好的耐久性和体积安定性<sup>[9]</sup>。

## 3 纤维混凝土存在的主要问题及目前纤维混凝土技术的研究发展方向

掺入纤维后,混凝土成本过大、性能不稳定是纤维混凝土应用中的主要问题。纤维一般用量较大,价格较高,纤维掺量大时,纤维在混凝土中容易产生纤维团,使得搅拌困难,在施工过程中钢纤维容易外露,这也增加了施工的难度。并且如钢纤维容易发生锈蚀,影响混凝土耐久性和使用安全。玻璃纤维由于耐碱性差,玻璃纤维增强混凝土的应用受到限制。此外,目前我国碳纤维大部分依赖进口,国内碳纤维生产能力仅占世界高性能碳纤维总产量的0.4%左右,纤维生产成

本高,成本过高是制约碳纤维增强混凝土发展应用的因素。

目前纤维混凝土的发展主要有以下三个方向:①通过化学或物理的方法改性纤维,通过物理或化学的方法对纤维进行改性,改善纤维与水泥基之间的界面粘结,增加纤维与水泥基的粘结力,可以提高纤维的作用效果。②不同类型纤维的混杂,混凝土具有多相、多组分,在多尺度层次上复合的非均质结构特征。不同尺度和不同性质的纤维混合增强,可在水泥基中充分发挥各种纤维的尺度和性能效应,并在不同的尺度和性能层次上相互补充、取长补短<sup>[10]</sup>。③纤维新品种的研究开发和研究,新型玄武岩纤维和水镁石纤维混凝土是新近研究开发很有发展前景的新型混凝土<sup>[11]</sup>,具有优异的综合性能和性价比。

参考文献

[1] 李继业,刘经强,徐羽白.特殊材料新型混凝土技术[M].北京:化学工业出版社,2007  
 [2] 李继业.新型混凝土技术与施工工艺[M].北京:中国建材工业出版社,2002

[3] 姜国庆,刘小泉,孙伟,秦鸿根.高性能特种水泥基复合材料(HPSCC)的关键技术研究,2007  
 [4] 钢纤维混凝土的研究现状和发展动态[J],2008  
 [5] 张晓峰.平阴黄河大桥钢纤维混凝土桥面铺装技术研究.2009.  
 [6] 赵永柱,周昊.浅谈聚丙烯纤维混凝土在面板中的应用[J].民营科技,2010.  
 [7] 王双林,崔庆怡,张涛,马健.聚丙烯纤维混凝土在法门寺合十舍利塔+54m穹顶壳体结构中的应用[J].陕西建筑,2008.  
 [8] 张卫东,徐学燕.碳纤维混凝土的特性及发展前景[J].森林工程,2004.  
 [9] 孙奇.常用纤维混凝土墙体板材性能的分析及比较[J].山西建筑,2010  
 [10] 贺东青,董志华.层布式混杂纤维混凝土的抗冲击性能[J].新型建筑材料,2009  
 [11] 吴刚,胡显奇,蒋剑彪,张敏.玄武岩纤维及其增强混凝土力学性能研究与应用[J].商品混凝土,2009

(上接第 14 页)

表 2 加固前及两种加固方案的抗震验算结果

墙段位置	加固前		方案一		方案二	
	一层	二层	一层	二层	一层	二层
A/1、17	0.96	1.29	2.82	3.60	4.23	6.63
A/2、16	0.90	1.17	2.85	4.10	4.28	6.42
A/3、15	0.85	1.09	2.88	3.60	4.33	5.63
1、17/A-B	1.32	1.86	2.27	3.08	3.39	4.77
2、16/ A-B	0.90	1.17	1.53	1.92	2.27	2.97
3、15/ A-B	0.85	1.09	1.40	1.71	2.14	2.06
C/2、16	2.6	3.17	3.17	3.86	2.65	3.23
C/4、8、10、14	0.76	0.93	1.96	1.17	1.95	2.38
C/5、13	0.75	0.92	2.0	1.19	1.92	2.36
C/7、11	0.75	0.92	1.90	1.14	1.92	2.35
C/3、15	0.93	1.21	1.58	9.38	4.58	6.56
C/6、9、12	0.93	1.21	1.58	9.38	5.14	7.12
D/1、17	1.93	1.31	2.60	3.01	2.57	2.68
D/2、4、5、7、8、10、11、13、14	1.18	1.49	1.53	1.94	1.51	1.98
D/3、6、9、12、15	1.75	2.55	2.37	3.49	2.34	2.73
3、6、9、12、15/C-D	0.93	1.21	1.59	1.98	1.56	2.05
1、17/ C-D	1.29	1.82	2.21	3.01	2.17	3.01

备注:A/1、17 表示 A 轴与 1、17 轴线交点两侧的纵向墙段;1、17/ C-D 表示 1、17 轴线上 C-D 轴间的墙体

[1] GB50003-2001,砌体结构设计规范 [S].  
 [2] 丁绍祥.砌体结构加固工程技术手册[M].武汉:华中科技大学,2008:232-289.  
 [3] 张熙光,王骏孙,刘惠珊.建筑抗震鉴定加固手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:108-281  
 [4] 中国建筑科学研究院.建筑抗震加固技术规程(JGJ 116-1999)[S].北京:中国建筑工业出版社,1999  
 [5] 本书编委会.简明砌体结构设计施工资料集成[M].北京:

中国电力出版社,2005  
 [6] 中国建筑科学研究院.建筑抗震鉴定标准 [S].北京:中国建筑工业出版社,2009  
 [7] 唐岱新.砌体结构[M].北京:高等教育出版社,2006

作者简介:高小丽,西安建筑科技大学硕士研究生(在校学生)