

钢纤维混凝土

理论及应用

程庆国 高路彬 编著
徐蕴贤 吴淑华

中国铁道出版社

铁路科技图书出版基金资助出版

钢纤维混凝土理论及应用

程庆国 高路彬
徐蕴贤 吴淑华 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

钢纤维混凝土作为一种新型复合建筑材料,近年来在国内外得到了迅速的发展,与普通混凝土相比,它不仅能明显地改善抗拉、抗剪、抗弯、抗磨和抗裂的性能,而且可以大大增强断裂韧性和抗冲击性,显著提高结构的疲劳性能及耐久性,加之施工简便在土建工程中得到了广泛的应用。

本书对钢纤维混凝土的本构模型、静力强度和疲劳损伤的变形特性以及在各种土建工程中的应用,从理论到实际进行了研究探索,取得了多方面的成果。

本书对钢纤维混凝土基本理论和增强机理的探讨、对设计计算方法的制订和完善、对钢纤维生产技术和推广应用无疑都将是有益的。

本书可以作为从事科研、设计、施工的工程技术人员以及高等院校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

钢纤维混凝土理论及应用/程庆国等编著. — 北京:中国铁道出版社,1999

ISBN 7-113-03278-8

I. 钢… II. 程… III. 纤维增强混凝土 IV. TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 12579 号

书 名: 钢纤维混凝土理论及应用

著作责任者: 程庆国 高路彬 徐蕴贤 吴淑华

出版·发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 冯秉明

封面设计: 马 利

印 刷: 北京市燕山印刷厂

开 本: 850×1168 1/32 印张: 7.5 字数: 194 千

版 本: 1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1—1500 册

书 号: ISBN 7-113-03278-8/TU·593

定 价: 22.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。



程庆国,浙江桐乡人,1927年生,1950年毕业于清华大学土木系,1956年毕业于苏联列宁格勒铁道学院获副博士学位。长期从事预应力混凝土、桥梁结构和铁道工程方面的科学研究和工程实践,先后获国家科技进步特等奖和二等奖,曾任铁道部科学研究院研究员、院长,国务院学位委员会铁道、公路、水运学科评议组召集人,中国土木工程学会副理事长,中国铁道学会副理事长,茅以升科技教育基金委员会主任等职。1991年被选为俄罗斯运输科学院外籍院士,1993年当选为中国科学院院士。



徐蕴贤,浙江海宁人,1933年生,1956年毕业于天津大学土木系工业及民用建筑专业,1961年毕业于捷克布拉格铁道学院获博士(Ph.D)学位。回国后长期从事铁路预应力混凝土轨枕、预应力钢材及钢纤维混凝土结构的研究工作,并在工程应用及实践中做出贡献。1988年在铁道部科学研究院任职期间被聘为研究员。曾参加编著《混凝土轨枕设计与制造》一书。曾任中国铁道学会铁道科学研究院分会秘书长,现任中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会纤维混凝土委员会副主任。



吴淑华,河北唐山人,1939年生,1963年毕业于清华大学土木系建筑材料及制品专业,长期从事于建筑材料及混凝土建筑物结构的检测、加固和修补的研究工作。在硫铝酸盐混凝土和纤维混凝土材料的研究工作中做出贡献。并于1980年荣获“硫铝酸水泥系列”国家发明二等奖。1988年在铁道部科学研究院任职期间被聘为副研究员。著有《硫铝酸盐水泥混凝土特性》等书。



高路彬,河北南和人,1965年生,1984年毕业于西南交通大学桥梁工程系,1986年获清华大学固体力学专业硕士学位,1989年获铁道部科学研究院桥梁结构专业博士学位,先后从事层状复合结构、材料本构理论和桥梁结构等方面的研究工作。曾任铁道部科学研究院研究工程师,1991年聘任为副研究员。1992年被评为北京市青年科技奖获得者。

前 言

钢纤维混凝土(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)作为一种新型建筑材料,近年来在国内外得到了迅速发展。和普通混凝土相比,钢纤维混凝土不仅能明显改善抗拉、抗剪、抗弯、抗磨和抗裂性能,而且能大大增强断裂韧性和抗冲击性能,显著提高结构疲劳性能及其耐久性,加以施工简便,价格相对低廉,所以在道路路面、桥梁结构、机场跑道、铁路轨枕、隧道衬砌、房屋建筑、水工结构等工程中应用日益广泛。随着钢纤维生产技术的不断进步和基础理论的不完善,钢纤维混凝土的应用领域必将进一步拓宽,发展前景未可限量。

在促进钢纤维混凝土技术发展和实用化过程中,其基本性能和基础理论的研究具有十分重要的意义。自 20 世纪 60 年代以来,国内外对钢纤维混凝土的基本力学特性、增强机理和各种构件的结构行为等方面都作了大量工作,取得不少进展,但仍有许多重要问题亟待研究解决。特别是对钢纤维混凝土的强度、变形和损伤的本构特性,以及疲劳变形与其损伤演化规律的研究尤为薄弱,远未得到满意的解决,从而影响钢纤维混凝土技术的进一步发展和推广应用。

为此,铁道部科学研究院在国家自然科学基金委员会的大力支持和资助下开展了这方面的试验研究*,其主要目的在于通过对钢纤维混凝土强度、变形,特别是疲劳损伤特性的试验研究,探讨钢纤维混凝土的基本力学性能、本构规律及增强机理,并试图求得适合于钢纤维混凝土结构分析的本构模型,从而为钢纤维混凝

* 本课题为国家自然科学基金资助项目“钢纤维混凝土的本构关系及疲劳损伤研究”,参加本项研究工作的有:程庆国、张琳、高路彬、徐蕴贤、潘家英、李启棣、吴淑华、卢移千、张永厚、张耀芳、孙俊武、何亚雄、范佳等。

土结构设计和分析提供必要的依据。自 1988 年至 1991 年,主要完成了以下各项试验研究任务:

——钢纤维混凝土基本强度规律的试验研究,包括抗拉、抗压、抗剪和抗弯强度,以及钢纤维掺量对强度的影响;

——钢纤维混凝土单轴及多轴应力状态下变形规律的试验研究,包括单轴压缩和三向压缩变形全曲线、弯曲和拉伸变形全过程、以及钢纤维掺量对变形规律的影响;

——钢纤维混凝土配筋梁静载弯曲性能和破坏形态的试验研究;

——钢纤维混凝土断裂能和断裂韧性的试验研究;

——钢纤维混凝土在单轴压缩状态下疲劳变形和损伤演化规律,以及疲劳寿命预测的试验研究;

——通过弯曲疲劳试验探讨了钢纤维混凝土的弯曲疲劳破坏机理以及疲劳变形和损伤的发展规律;

——基于连续损伤力学理论,提出了一种新的钢纤维混凝土损伤本构模型,并对其各种简化情况和损伤演化规律进行了系统的讨论,对其预测能力进行了分析和试验验证;

——探讨了钢纤维混凝土在实际工程中的应用情况和损伤本构模型用于实际结构分析的可行性问题。

本项研究内容包括试验研究和理论分析两部分,第一部分着重对钢纤维混凝土在拉伸、压缩、弯曲和剪切等性能方面包括强度和变形特性进行比较全面而系统的试验研究,第二部分包括本构理论、疲劳模型和计算方法研究,以损伤和变形为重点,深入探讨钢纤维混凝土变形和损伤演化规律,并以连续损伤理论研究钢纤维混凝土的本构规律,提出损伤本构模型。在整个研究过程中,始终以损伤理论指导试验,以试验做为理论分析和研究探讨的基础。

钢纤维混凝土本构关系和疲劳损伤研究是一个有待开拓的新领域,涉及面广,也比较复杂,本项研究以理论结合实际,进行了探索,取得了多方面的成果。由于时间、经费和试验条件的限制,研究工作在试验范围和规模上不能不有所局限,有些问题的探讨也

有待进一步深化和拓展,但本项研究内容比较系统而全面,所取得的成果对钢纤维混凝土基本理论和增强机理的探讨,对其设计计算方法的制定和完善,以及对钢纤维混凝土生产技术的发展 and 推广应用无疑都将是有益的。

可以预见,由于钢纤维混凝土在抗拉、抗弯、抗剪、阻裂、抗冲击、耐疲劳等方面具有一系列优越性能,通过科研、教学、设计、施工各方面的共同努力,这种新型复合材料必将更加广泛应用于我国土木建筑工程的各个领域,并且使我国纤维混凝土的理论研究和工程技术的发展达到一个新的水平。

程庆国

一九九九年六月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 纤维增强混凝土.....	1
第二节 纤维增强混凝土的应用与发展.....	4
第三节 钢纤维混凝土基本特性和本构理论的研究.....	7
第四节 钢纤维混凝土的发展前景	11
第二章 钢纤维和钢纤维混凝土的基本特性	16
第一节 钢 纤 维	16
第二节 钢纤维混凝土	19
第三节 钢纤维混凝土的基本特性	27
第四节 钢纤维混凝土的其他物理性能	39
第五节 硅灰钢纤维混凝土和大掺量钢纤维混凝土	41
第三章 钢纤维混凝土的静力强度和变形特性	49
第一节 概 述	49
第二节 钢纤维混凝土在单轴应力作用下的强度和 变形特性	50
第三节 钢纤维混凝土在多轴应力作用下的强度和 变形特性	64
第四节 钢纤维混凝土的弯曲强度和变形特性	74
第五节 钢纤维混凝土的断裂能和断裂韧性	84
第四章 钢纤维混凝土的疲劳强度和变形特性	95
第一节 概 述	95
第二节 钢纤维混凝土疲劳变形和损伤的基本规律	96

第三节	钢纤维混凝土单轴压缩疲劳强度、变形及损伤特性·····	100
第四节	钢纤维混凝土弯曲疲劳强度、变形及损伤特性·····	111
第五节	钢纤维混凝土疲劳性能增强机理探讨·····	120
第五章	钢纤维混凝土本构模型·····	122
第一节	概 述·····	122
第二节	钢纤维混凝土单轴变形全曲线的数学描述·····	124
第三节	钢纤维混凝土的非线性弹性本构模型·····	126
第四节	钢纤维混凝土的弹塑性本构模型·····	129
第五节	钢纤维混凝土的内时本构模型·····	131
第六节	钢纤维混凝土的损伤本构模型·····	135
第七节	钢纤维混凝土断裂韧性增强机理的分析模型·····	165
第八节	钢纤维混凝土单轴压缩疲劳模型·····	168
第九节	钢纤维混凝土的有限元分析·····	173
第六章	钢纤维混凝土的应用·····	181
第一节	钢纤维混凝土在建筑结构中的应用·····	181
第二节	钢纤维混凝土在桥梁结构及桥面工程中的应用·····	188
第三节	钢纤维混凝土轨枕·····	194
第四节	喷射钢纤维混凝土·····	198
第五节	钢纤维混凝土路面·····	202
第六节	钢纤维混凝土在水工方面的应用·····	209
第七节	钢纤维混凝土在结构物局部增强及加固中的应用·····	213
第八节	钢纤维混凝土在其他工程中的应用·····	219
主要参考文献·····		224

第一章 绪 论

第一节 纤维增强混凝土

19 世纪 20 年代出现波特兰水泥后,混凝土作为一种新型建筑材料,以其骨料可以就地取材,构件易于成型等突出优点,日益广泛应用于土建工程。尤其是 19 世纪中叶以后,钢铁生产发展,随之出现了钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)这种新的复合建筑材料,其中钢筋承受拉力,混凝土承受压力,发挥各自的优点,初步克服了混凝土抗拉强度低、用途受限制的弱点。20 世纪 30 年代开始出现预应力混凝土(Prestressed Concrete, PC),其结构的抗裂性能、刚度和承载能力,大大超过了钢筋混凝土结构,从而显著扩大了混凝土的应用范围,拓展了许多新的应用领域,使土木工程进入了钢筋混凝土和预应力混凝土占统治地位的历史时期。混凝土给建筑物带来了新的经济而美观的工程结构形式,促使土木工程产生了新的结构设计计算理论和新的施工工艺技术,在土木建筑工程技术发展史上完成了一次新的飞跃。

尽管钢筋混凝土和预应力混凝土取得了长足的进步,但是混凝土作为建筑材料存在的固有弱点——抗拉强度低(一般仅为抗压强度的 $1/10$ 左右)、韧性差等却依然限制着它的优势的充分发挥,并且随着混凝土强度的不断提高,这一弱点也愈益突出。因此,长期来许多专家学者不断探索改善混凝土性能(主要是提高抗拉性能,增强韧性和延性)的各种方法和途径。纤维增强混凝土就是近年来研究和应用最广的重要途径之一。

纤维增强混凝土或简称纤维混凝土,是以水泥浆、砂浆或混凝土为基材,以金属材料、无机纤维或有机纤维为增强材料组成的一种复合材料。水泥石、砂浆与混凝土的主要缺点是抗拉强度低、极限延伸率小、性脆,掺加抗拉强度高、极限延伸率大、抗碱性好的纤

维可以克服上述缺点。

用纤维增强脆性材料以提高材料的强度和韧度的概念自古有之。最早的实例是用稻草或动物毛发增强粘土制品。纪元前2500年左右芬兰人曾用石棉纤维提高陶瓷的抗拉和抗挠强度。

掺用短的钢纤维增强水泥和混凝土以提高其抗拉力的想法早在1910年就由H.F.Porter提出过,但是直到1963年J.P.Romualdi和G.B.Batson关于纤维水泥复合材料的研究结果发表以后,这种复合材料的研究和应用才受到愈来愈广泛的重视。

纤维混凝土中常用的纤维按其材料性质可分为:金属纤维(如钢纤维和不锈钢纤维)、无机纤维(主要有石棉等天然矿物纤维和抗碱玻璃纤维、抗碱矿棉、碳纤维等人造矿物纤维)和有机纤维(主要有聚乙烯、聚丙烯、尼龙、芳族聚酰亚胺等合成纤维和西沙尔麻等天然植物纤维)。按其弹性模量可分为高弹模纤维(弹性模量高于水泥基料者,如钢纤维、碳纤维、玻璃纤维等)混凝土和低弹模纤维(如聚丙烯纤维、某些植物纤维等)混凝土。按纤维长度可分为非连续的短纤维(具有一定长径比,即纤维长度与直径的比值)和连续的长纤维(如玻璃纤维无捻粗纱、聚丙烯纤维化薄膜等)。制造纤维混凝土主要使用短纤维,但有时也使用长纤维或纤维制品(如玻璃纤维网格布、玻璃纤维毡等)。

纤维在纤维混凝土中的主要作用,在于限制在外力作用下水泥基料中裂缝的扩展。在受荷(拉、弯)初期,水泥基料与纤维共同承受外力,而前者是外力的主要承受者;当基料发生开裂后,横跨裂缝的纤维成为外力的主要承受者。若纤维的体积掺量超过某一临界值,整个复合材料可继续承受较高的荷载,并产生较大的变形,直到纤维被拉断或纤维从基料中被拔出,以致复合材料破坏。因此,与普通混凝土相比,纤维混凝土具有较高的抗拉和抗弯极限强度,而尤以韧性提高的幅度为大。

由于纤维的存在,从微观机制上改良了基体的力学性能,并且可以实现按照使用要求设计材料的目的,从而使纤维混凝土成为一种重要的新型建筑材料,被广泛应用于航空、航天、电子、电气、

机械、建筑、能源等各个领域的土建工程中。

土木建筑工程中应用的纤维增强复合材料大部分是钢纤维和玻璃纤维增强混凝土。碳纤维等新型材料在发达国家则正积极研究开发,但目前尚处于试验试用阶段。钢纤维混凝土的应用则日益广泛。通用的钢纤维有圆形或矩形的长直纤维和多种异形钢纤维。纤维的长径比一般为 $50 \sim 100$, 纤维的体积掺量一般为 $1\% \sim 2\%$ 制备钢纤维混凝土的方法通常是将钢纤维和混凝土混合后,再经振捣、离心或喷射等法成型。当配料合适并掺有适宜的高效减水剂时,则可制成泵送钢纤维混凝土。用制备普通混凝土的方法制成的钢纤维混凝土与素混凝土相比具有一系列优越的物理和力学性质:

1. 强度和重量的比值增大。这是纤维增强混凝土具有优越经济性的重要标志,也是它具有广阔应用发展前景的重要保证;

2. 具有较高的抗拉、抗压和抗弯的极限强度。在混凝土中掺入适量钢纤维,其极限抗压强度可适当提高,单轴抗拉极限强度可提高 $40\% \sim 50\%$, 抗弯极限强度可提高 $50\% \sim 150\%$;

3. 具有卓越的抗冲击性能。与素混凝土相比,钢纤维混凝土在纤维掺量为 $0.8\% \sim 2.0\%$ 时,其冲击韧性指标可以提高 $50 \sim 100$ 倍,甚至更高,因此钢纤维混凝土用于承受冲击载荷、疲劳载荷和爆炸载荷的结构,其优越性十分明显;

4. 变形性能明显改善。钢纤维对混凝土抗压弹性模量影响不显著,但对抗拉弹性模量提高较多。纤维对混凝土长期收缩变形性能的影响也较明显,钢纤维可使混凝土的收缩率降低 $10\% \sim 30\%$;

5. 抗裂和抗疲劳性能显著提高。由于钢纤维在混凝土中的阻裂机制,钢纤维混凝土具有比素混凝土更好的软化后性能和抗裂疲劳性能;

6. 具有优良的抗剪性能。钢纤维在梁的受力过程中可以降低腹板的剪切变形,并有效地控制剪切裂纹的开展,提高腹板的抗剪强度。G. B. Batson 等认为钢纤维的掺入可以取代受弯梁中的竖

向箍筋。R.N.Swamy 和 H.M.Bahia 的研究结果表明,加入钢纤维后梁的抗剪强度随弯曲强度线性增加,在具有 1.95% 的拉伸钢筋和 0.8% 的钢纤维(体积掺量)的 T 型梁和矩形梁中不产生剪切破坏,在 2% ~ 4% 拉伸钢筋和 0.8% ~ 1.2% 的钢纤维(体积掺量)的情况下,比无钢纤维梁可以提高 80% 的抗剪极限强度。

由于以上优越性,纤维增强混凝土,特别是钢纤维增强混凝土在路面、桥面、机场跑道、抗震抗爆结构等土建工程中得到日益广泛的应用,且其前景十分广阔。

第二节 纤维增强混凝土的应用与发展

早在 1910 年,美国 H.F.Porter 即发表了有关以短纤维增强混凝土的研究报告,建议把短纤维均匀分散在混凝土中用以强化基体材料。1911 年,美国 Graham 曾把钢纤维掺入普通钢筋混凝土中,得到了可以提高混凝土强度和稳定性的结果。到了 20 世纪 40 年代,美、英、法、德等国先后公布了许多关于用钢纤维混凝土补强混凝土结构方面的专利,例如掺用钢纤维来提高混凝土的耐磨性和抗裂性、钢纤维混凝土制造工艺、改进钢纤维形状以提高纤维与混凝土基体的粘结强度等。日本在第二次世界大战期间,由于军事上的需要,也曾进行过有关钢纤维混凝土方面的研究,但当时均尚未达到实用化的程度。

1963 年 J.P.Romualdi 和 G.B.Batson 发表了一系列关于钢纤维约束混凝土裂缝开展的机理,提出了钢纤维混凝土开裂强度是由对拉伸应力起有效作用的钢纤维平均间距所决定的结论(纤维间距理论),从而开始了这种新型复合材料的实用化开发研究阶段。1969 年,美国批准了“混凝土和钢材组成的二相材料”专利,奠定了现今钢纤维混凝土技术的基础。但是钢纤维价格昂贵,阻碍了它在实用化方面的推广应用。20 世纪 70 年代,美国 Battelle 公司开发了熔抽技术,制造出廉价钢纤维,为这种复合材料的实际应用创造了有利条件。此后 20 多年,钢纤维混凝土在发达国家和发展中国家的开发研究受到普遍重视,尤以日本、美国、英国进展

最快。

在美国,钢纤维混凝土的研究和开发工作主要由 Battelle 公司和陆军工程兵部门建筑技术研究所进行。此外,伊利诺大学受联邦铁路局的委托进行了钢纤维混凝土在地下铁道衬砌中应用的研究。同时,路面铺设和喷射钢纤维混凝土的研究也广泛展开。美国在高层建筑中已经大量采用纤维增强混凝土预制墙板、阳台、波纹板和空心楼板,铺设了大量公路路面和桥面,纤维增强复合材料产品 1984 年比 1979 年增长 28.36%,平均每年增长 5.5%,近年的增长率更高达 10% 以上。美国较有代表性的应用实例为德克萨斯州胡德堡坦克停车场罩面工程和丹佛国际机场。前者由于使用了钢纤维混凝土作护面材料(施工面积 22572m²),使用寿命由原来的 3~4 年提高到 25 年;后者使用了掺粉煤灰的纤维混凝土,显著减小了铺面厚度,节约了大量投资。在拉斯维加斯机场跑道中的应用同样获得了成功。

在加拿大,纤维增强混凝土也已广泛应用于建筑结构。近年来,拉法尔格水泥应用研究中心和工业材料研究院合作,于 1985 年建立了一个北美最大的纤维混凝土私营实验室,并开始研究道路用纤维水泥和纤维混凝土的性能,同魁北克交通部合作在蒙特利尔进行了玻璃纤维混凝土和钢纤维混凝土两种路面(11 块 60×12 英尺)的铺设试验。试验表明,当用玻璃纤维增强时路面厚度可减少 20%,用钢纤维增强时路面厚度可减少 45%。阿尔伯特州交通部自 1950 年起即开始建造钢纤维混凝土预制简支梁桥构件(跨径 6.1~11.6m,宽 0.9~1.2m)。此外,钢纤维混凝土还广泛应用于桥面铺装、桥梁局部补强和加固、水管制造等方面。

在欧洲,英国 National Standard CO. 和 Johnson and Nephew Co. Ltd. 两公司,以及丹麦 B·B·海德豪森公司首先建立了纤维增强水泥和混凝土专业工厂,英国 Sheffield 大学 R.N. Swamy 研究组则积极开展纤维增强混凝土的基础理论和设计施工方面的工程实际问题研究,取得了系列成果。钢纤维混凝土成功地应用于伦敦希思罗机场高层停车场的预制地板、法兰克福国际机场跑道和停机

坪的改建工程、瑞典岩石稳定和结构加固工程(采用 Ekebro 纤维喷射混凝土技术)。在欧洲,钢纤维混凝土应用最广的是工业建筑中的地板和墙板,以及路面铺装,1987 年即约有 200 万 m^2 地板被采用。其次为隧道衬砌和各种预制建筑构件(奥地利、比利时等)。

在日本,首先于 1973 年由日本钢管株式会社用切断冷延薄钢板的方法生产出商品钢纤维,接着于次年住友金属株式会社用同样方法制造出异形钢纤维向市场出售。1977 年新日本制铁株式会社也先后步入生产钢纤维的行列。嗣后东京大学生产技术研究所中村副教授研制成功机械切削生产钢纤维的新方法,使生产便宜而优质的钢纤维成为可能。除东京大学外,德岛大学、名古屋大学,以及鹿岛建设、清水建设、日本钢管、住友金属和新日本制铁等株式会社也纷纷开展钢纤维混凝土研究开发工作,并推广应用于建筑结构、隧道衬砌(如中央高速公路惠那山隧道)、路面铺装(如国有公路 4 号线黑砚辅助线等)、水工结构护面(如曼亚坝溢洪道挑流工程等)、机场跑道、桥面和结构局部补强等方面。

印度在 20 世纪 70 年代初即开始钢纤维混凝土的研究和开发工作,迄今主要用于工业厂房楼板和机场停机坪铺面工程,以及预制混凝土构件的生产,例如市政工程中的进入孔盖板。马德拉斯结构工程研究中心曾开发了各种轻、重型钢纤维混凝土进入孔盖板的制造工艺。新德里中央道路研究院最近也开展了纤维增强混凝土路面铺设的现场试验。

我国研究和应用钢纤维混凝土开始于 20 世纪 70 年代,而近十多年来,发展异常迅速。到 1988 年全国已有五家工厂生产碳钢和不锈钢纤维,当年工程用量即达 500t(应用较多的是带弯钩的低碳钢纤维,但也有采用异形纤维的)。应用范围日益广泛,领域不断拓宽。除建筑结构构件(如墙板、楼板、框架结构节点等)外,已成功推广于公路路面、机场跑道(道面厚度可减薄 40% ~ 50%)、桥面铺装(如北京安慧立交桥)、薄壁水管(东南大学用离心法成型制成内径 300mm、壁厚 30mm 输水圆管;北京市政工程研究所采用振动法和挤压法制成直径 195mm、壁厚 28.5mm 钢纤维圆

管;淮阴工业专科学校研制成功直径 550mm、壁厚 30mm 低压输水泵管,均具有工艺简便、造价低廉、性能良好的优点)、轨枕(铁道科学研究院和太原轨枕厂经详细试验研究已投入批量生产)等方面。喷射钢纤维混凝土亦已广泛应用于隧道与矿山巷道衬砌、桥梁加固(墩台补强或修补,例如北京坝河三岔河一座跨径 42m 拱桥开裂后应用钢纤维混凝土补强加固等)、水工大坝防渗面板、桩头等工程,均取得显著的技术经济效益。

随着钢纤维混凝土材质的提高、工艺的改进、机理探讨的逐步深入,现在已开始应用于新型长大建筑结构中。一个突出的例子是贵州乌江预应力钢纤维混凝土(PFC)吊拉组合索桥。该桥净跨 288m,全长 462m。PFC 吊拉组合索桥是吸取斜拉桥和悬索桥的优点,由两者组合而形成的一种新型悬吊桥梁,其加劲主梁为由钢筋、钢丝网、钢纤维混凝土预制拼装而成的薄壁箱梁,并施加有预应力。锚碇板和桥面铺装亦均采用钢纤维混凝土。此种结构跨越能力大,结构刚度高,钢纤维混凝土的应用可显著降低箱形主梁自重,节约索材,并改善桥梁结构性能,特别是提高吊拉组合部位的抗疲劳破坏能力。与此相类似,重庆交通学院、贵州省桥梁公司等还为贵州南盘江大桥提出了设计(主跨 240m)。同时,在四川和贵州已设计修建了几座 20~40m 跨径的钢纤维混凝土薄壁箱形连续梁桥。这些工程实践无疑为钢纤维混凝土作为新型建筑材料应用于承重结构开辟了新的发展途径。

在发展钢纤维混凝土的同时,还必须指出,其它纤维增强混凝土也得到了相应的进展。特别是玻璃纤维混凝土,由于采用了抗碱玻璃纤维和低碱水泥配套使用,克服了玻璃纤维混凝土的耐久性问题,改善了玻璃纤维混凝土的制作工艺和产品开发,使我国这一技术领域进入了国际先进行列。

第三节 钢纤维混凝土基本特性和本构理论的研究

在促进钢纤维混凝土技术发展和实用化过程中,其基本性能和基础理论的研究具有十分重要的意义。自 20 世纪 60 年代以