



王 焕 德

钢纤维混凝土



SHUILI KEJI CHENGGUO CONGSHU

钢纤维混凝土

王 焕 德

水利电力出版社

21065/51

内 容 提 要

钢纤维混凝土是近年来发展起来的一种新型建筑材料，广泛运用于水利、国防、道路、工民建及机场跑道等方面。本书详细介绍了钢纤维混凝土的性质、强度计算、韧性与挠曲强度、配合比及其计算方法、施工工艺等，并介绍了国内外有关方面的实际运用经验。本书可供有关专业的技术工人和技术人员使用。

《水利科技成果》丛书

钢纤维混凝土

王焕德

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 3印张 62千字

1985年3月第一版 1985年3月北京第一次印刷

印数00001—11620册 定价0.66元

书号 15143·5646

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书。包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员：史梦熊

副主任委员：董其林

委 员：丁联臻 王万治 史梦熊 田 园
李文治 邴凤山 杨启声 张宏全
张林祥 沈卅卿 陈祖安 陈春槐
汪景琦 郑连第 郭之章 赵珂经
茆 智 陶芳轩 谈国良 徐曾衍
蒋元骝 曹述互 曹松润 董其林
顾振元

(以姓氏笔划为序)

前 言

纤维混凝土是一种复合材料。近十年有了迅速发展，在工业、交通、国防、水利、矿山等工程建设中，得到了推广应用。

所谓复合材料，是由纤维与基体两部分组成的。纤维种类很多，有钢纤维、玻璃纤维、石棉纤维、聚丙烯、维尼纶、硼纤维、涤纶、棉、麻等。作为复合材料基体的有水泥砂浆、混凝土、环氧树脂、石膏等。

复合材料，与原有基体比较，抗压、抗拉、抗挠曲、抗冲击、抗疲劳、抗冲刷强度等，都有所改善，某些强度几乎有成倍的或成十倍的增加。如常见的有：以石棉为纤维，以水泥砂浆为基体的石棉纤维水泥；以棉纱为纤维，以石膏为基体的石膏绷带。这些都是在基体中掺入纤维后，使原有的脆性材料改变了力学性质，变得富有韧性，并增强了抗裂性能。施加在基体上的荷载，借助于作用在界面上的粘着力传递到纤维上。如果纤维的弹性模量大于基体的弹性模量，那么基体开裂后，大部分力由纤维来承受。所以，复合材料的强度与纤维体积含量成正比。钢纤维的弹性模量比混凝土高10倍以上，是最有效的增强材料之一。玻璃纤维的弹性模量比混凝土高2倍以上，比石膏高3倍，也是一种有效的增强材料。聚丙烯纤维、尼龙纤维等的弹性模量低于普通混凝土。一般钢、玻璃、石棉、碳等纤维为高弹性模量纤维。尼龙、聚乙烯、聚丙烯等纤维为低弹性模量纤维。弹性模量比

混凝土高的纤维掺入后，可使复合材料获得较高的韧性，并增加抗拉强度、刚度和承担动荷载的能力。比混凝土弹性模量低的纤维掺入混凝土后，只能增加韧性，不能提高强度。有关复合材料的理论和应用，范围甚广，本书仅就钢纤维混凝土的基础理论与应用，作一些介绍，而且侧重于应用方面。

现将钢纤维混凝土的发展历史作一简要介绍。最先进行研究的是1910年美国入波特（Porter）。他把薄钢片掺入混凝土中，以改善混凝土的抗拉强度及改变其抗冲击性能，并于1914年获得专利权。1911年美国格莱汉（Graham），1914年菲克利（Ficklim）亦用相同的方法，获得了成功，并在某些方面进行了改进。但只有到了1963年罗缪弟（Romualdi）和巴特森（Batson）发表了混凝土开裂机理中钢纤维间距影响的著作后，才引起了广泛的重视。随着钢纤维混凝土的迅速推广，1966年美国混凝土学会增设了纤维混凝土委员会（ACI Commitee 544），1973年在加拿大渥太华举办了纤维混凝土国际会议，1975年在伦敦由国际材料及结构试验联合会主办召开了纤维水泥及混凝土的国际讨论会。在众多的论文中，钢纤维混凝土的论文占多数，说明了钢纤维混凝土迅速发展的趋势。在国外，以美国和英国发展最快。近年来，日本亦有较快发展。其他如苏联、西欧各国以及澳大利亚等，都在进行研究和应用。

我国在七十年代开始引进这一新技术，以国防科委及建筑研究院为最早。华东水利学院、西安航空工程学院等单位在1978年左右进行了大量的试验研究。浙江省水利水电科学研究所及杭州市林业水利局亦在这段时间内进行了若干基本物理力学性能的试验研究及现场施工工艺的研究。这些试验

大多限于平直纤维。杭州市林业水利局最先开始轧制弯钩纤维，并且进行了与平直纤维的对比研究。八十年代，我国的这一技术发展较快，研究单位大量增加，应用亦有发展，如冶金部建筑研究所在南京梅山铁矿溜井巷道等处，就是采用的钢纤维混凝土衬砌。江西九江专区都昌县大港水库在溢洪道亦用这一复合材料衬砌。浙江从1979年开始用钢纤维混凝土修补百丈漈水电站压力隧洞、水轮机井底板及尾水暗渠的混凝土底板，都获得了成功。最近计划推广应用于水库溢洪道及水工闸门上。其它如葛洲坝、都江堰等亦已试用钢纤维混凝土作为防冲刷材料。与此同时，建筑部门也将钢纤维混凝土推广应用到建筑结构上，如南京市第三建筑工程公司在建造南京市五台山体育场主席台时，屋面就是采用现浇钢纤维钢筋混凝土大悬臂薄壳折板结构，外挑14米。铁道部门试用喷射钢纤维混凝土加固隧道衬砌等，均取得较为满意的效果。可以预计，在四个现代化建设中，这一新材料将获得更大的发展。

本书在编写过程中，承浙江省水利厅余松润同志多次校核，并提出了很多宝贵意见。省水科所戚星海同志在校核的同时，并编写了钢纤维混凝土的定向和集中，反喷射钢纤维混凝土这两部分内容，还提供很多参考资料。余杭县四岭水库指挥部朱仲安同志、殷梦得同志协助抄录绘图，使本书得以顺利完成。特在此对以上诸同志表示衷心感谢。由于编者水平有限，书中不妥之处，谨请读者指正。

编 者

1984.4

目 录

前 言

第一章 钢纤维混凝土的物理力学性质及强度计算	1
一、物理力学性质.....	2
二、强度计算.....	6
第二章 钢纤维混凝土的韧性及挠曲强度	18
一、韧性.....	18
二、挠曲强度.....	21
第三章 钢纤维混凝土的配合比	28
一、概述.....	28
二、骨料与砂率.....	28
三、水泥及水灰比.....	32
四、钢纤维.....	33
五、配合比计算方法.....	34
第四章 钢纤维混凝土的施工	41
一、概述.....	41
二、搅拌.....	42
三、浇筑.....	43
四、运输、振捣、抹面.....	44
五、钢纤维的定向和集中.....	45
六、钢纤维混凝土.....	46
第五章 钢纤维混凝土的应用	52
一、公路、桥面、机场跑道的护面.....	52

二、在水利工程中的应用.....	58
三、喷射钢纤维混凝土的应用.....	69
四、耐火工程.....	72
五、结构构件.....	72
六、桩头和桩帽.....	76
七、其它.....	77
第六章 钢纤维混凝土存在的问题和发展前景.....	79
一、存在问题.....	79
二、发展前景.....	80
参考文献.....	83

第一章 钢纤维混凝土的物理力学性质及强度计算

钢纤维对基体有增强作用，基体中加入钢纤维后，可大大提高混凝土的韧性，其他物理力学性质如抗压、抗拉、抗挠曲强度等，都有不同程度的提高。复合材料的强度牵涉到很多因素，主要取决于如下几方面。首先是混凝土基体强度，基体强度高，对纤维粘着力相应亦大，复合材料强度也较高。再有就是纤维长细比，长细比即纤维长度与纤维直径的比率。一般来说，长细比总是大一点为好，这样基体和纤维的界面上可产生较大的粘着力，增加纤维在基体中的握固力，使纤维承受较大的拉应力，更好地发挥复合材料的作用。对钢纤维来说，因本身能承担的拉应力很大，而基体对纤维产生的粘着力远小于钢丝的抗拉强度，如果长细比太小，就不能充分发挥纤维的强度。但长细比过大，在施工中纤维较易集中成束，反而不容易密实。所以长细比一般在50~100左右为宜。此外施工质量、混凝土配合比、纤维类型与复合材料强度均有一定关系，但与复合材料强度关系最密切的是纤维在复合物中的体积含量，它在以上介绍的复杂因素中起主导作用。

现分别就钢纤维混凝土的抗压、抗拉、抗挠曲强度、弹性模量等叙述如下。

一、物理力学性质

1. 抗压强度

钢纤维加入基体后，其抗压强度是否增加，认识尚不一致。有人认为无甚增加。但从较多的试验资料看，钢纤维混凝土的抗压强度与基体相比，略有增加，但增加不多。

2. 抗拉强度

一般钢纤维混凝土抗拉强度均用劈裂抗拉试验方法求得。因为轴心抗拉试验方法较为复杂，如有少量偏心荷载，往往会产生较大误差。用劈裂法测定的试件抗拉强度计算公式如下

$$R_P = \frac{2P}{\pi F} = 0.637 \frac{P}{F}$$

式中 R_P ——试件劈裂抗拉强度 (kg/cm²)，

P ——破坏荷载 (kg)，

F ——试件的抗拉断面积 (cm²)。

与素混凝土对比，当钢纤维体积掺量 $V_f = 1.28\%$ 时，劈裂抗拉强度比素混凝土增加12~50%。挠曲抗拉强度增加20~80%。劈裂抗拉强度换算成轴向抗拉强度，其比率为：轴拉/劈裂=0.92。所谓钢纤维体积掺量，即钢纤维占复合材料体积的百分比。

3. 弹性模量

钢纤维混凝土在相同纤维体积含量下的抗压、抗挠曲弹性模量基本相同。弹性模量与钢纤维体积含量的关系，根据混合物法则有如下关系式

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

式中 E_c 、 E_f 和 E_m ——分别为复合材料、纤维和基体的弹性模量；

V_f ——纤维的体积百分比；

V_m ——基体的体积百分比。

鉴于上述基本公式，国内外大部分学者认为，钢纤维混凝土的弹性模量随纤维含量增加而略有增加。由于纤维与基体之间还会发生滑动，所以公式（1）是纤维混凝土弹性模量的上限。但也有少数学者通过实验发现，当 V_f 增加时钢纤维混凝土的弹性模量反而减小。如美国混凝土学会杂志1979年刊登Walkes的论文中，分别就钢纤维直径为0.25、0.35、0.50毫米，掺量 V_f 为0.6%、1.2%、1.8%时的拉伸弹性模量与素混凝土拉伸弹性模量对比，实验结果如表1所示。

表 1 钢纤维混凝土不同 V_f 的弹性模量
（Walkes实验结果）

E $V_f\%$ d	0.25	0.35	0.50	备 注
0	18.6	18.6	18.6	弹模 10^4 kg/cm^2 纤维直径毫米
0.6	18.4	18.1	15.8	
1.2	18.2	17.7	15.2	
1.8	15.8	17.1	14.7	

4. 耐久性

由于钢纤维混凝土问世不久，因此关于耐久性问题的资料不多。曾有人将无裂缝的钢纤维混凝土放在海水和工业污水中浸泡7年，证明钢纤维不受影响，碳化深度在密实的混凝土中小于5毫米，在轻混凝土中，局部深度达到6毫米。

将未裂试件，暴露于 -23°C 至 $+38^{\circ}\text{C}$ 的温度中，每年冻融循环大约80次，共观察了5年，测定其强度反而有所增长。因此可以认为，钢纤维混凝土的耐久性与普通混凝土一样。

5. 抗冻性

钢纤维混凝土的抗冻性比普通混凝土高，加气钢纤维混凝土的抗冻融性能更为优良，当掺气量为 $5\sim 6\%$ 时，根据试验报告，素混凝土冻融循环大约为500次，而相应的钢纤维混凝土在 $V_f=2\%$ 时，可达1400次。

6. 耐热性能

由不锈钢纤维配筋的耐火混凝土，经证明，可应用于温度高达 1500°C 的各种耐火构件中。纤维能抵抗混凝土开裂、剥落与腐蚀，并可抵抗冲击荷载，增加抗弯强度。

有人测定不锈钢纤维含量为 $V_f=1\%\sim 2\%$ 的耐火混凝土试块，在 1200°C 的高温下，材料的抗挠曲强度与抗冲击强度都有所提高，抗压强度也没有降低。这种材料可应用于平板轧机预热炉炉门，长期经受 1270°C 的高温，证明其使用寿命比普通耐火制块寿命长。

7. 抗爆性能

纤维混凝土抗冲击性能比一般混凝土优越，它能吸收大量能量，既能抵抗机械冲击，又能抵抗由于爆炸引起的冲击。这是纤维混凝土的重要特性之一。抗爆性能的一个重要指标，是爆炸时的碎片速度。对含 $V_f=1.25\%$ 的钢纤维混凝土板作爆炸试验，其最大碎片速度约可降低 18% 。此外曾有人对纤维混凝土作爆破试验，发现可破坏素混凝土的爆炸量，不能破坏含有 1% 体积比的聚丙烯纤维混凝土或钢纤维混凝土，其抗爆能力比普通混凝土高 $5\sim 10$ 倍。

8. 抗扭曲强度

钢纤维混凝土抗扭曲强度基本上与素混凝土相同。纤维掺量 V_f 达 4 % 的钢纤维砂浆，在扭力试验中，以每分钟一度角度的速度扭转，测得钢纤维砂浆抗扭强度，只略高于普通砂浆，也可以说，基本上是相同的。

9. 耐冲击强度

钢纤维混凝土具有较好的耐冲击性能。日本制铁公司曾以 $150 \times 150 \times 530$ (毫米) 试块作落球试验，钢球直径为 10.2 厘米，重 4.3 公斤，自由落下距离为 1.0 米，试验装置如图 1 所示。记录其表面出现裂缝和破坏时的撞击次数，其结果见表 2。

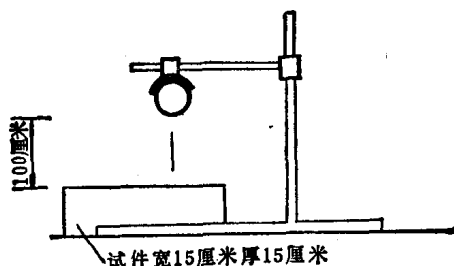


图 1 冲击试验架示意图

表 2

落 锤 试 验 成 果

种 类	试验次数	钢球落下次数			剥离砂浆尺寸 (厘米)
		至表面 开裂	至表面砂 浆剥离	至破坏	
素混凝土		4		14	
钢纤维 混凝土	一	5	7	>50	$5.5 \times 6.0 \times 0.8$
	二	7	10	>50	$5.0 \times 6.0 \times 1.0$
	三	8		40	

10. 耐疲劳特性

钢纤维混凝土耐疲劳性能优于素混凝土。曾对 $6.4 \times 7.6 \times 96.5$ 厘米的水泥砂浆梁和配有平直纤维（直径为0.152毫米，长12.7~15.9毫米）的钢纤维混凝土梁（ $V_f = 2 \sim 2.5\%$ ）进行疲劳试验。当钢纤维砂浆挠曲应力为66.2~101.9公斤/厘米²、素水泥砂浆静荷重挠曲应力为48.6公斤/厘米²时，经200万次至300万次的疲劳试验，将测定出的疲劳应力与静力破坏应力对比，根据50次以上的试验资料统计，钢纤维砂浆动应力系数为0.95，素水泥砂浆约为0.65。

钢纤维混凝土的主要物理力学性质归纳如表3所示。

表 3 钢纤维混凝土力学性能

材料种类		抗压强度	轴向抗拉强度	挠曲强度	抗剪强度	弹性模量	抗冲击强度
素混凝土		R_{mc}	R_{mt}	R_{mf}	τ_{ms}	E_m	
钢纤维混凝土	平直纤维	1.1~1.4 R_{mc}	1.12~1.5 R_{mt}	1.13~1.53 R_{mf}	1.75 τ_{ms}	基本一致	5~10倍
	变形纤维	1.13~1.5 R_{mc}	1.2~1.8 R_{mt}	1.2~1.8 R_{mf}			

二、强度计算

对钢纤维混凝土进行理论上的探讨，其目的是为了研究这一复合材料的强度及各种物理性质。钢纤维掺入基体后，改善了基体的脆性状态，并能增强基体的强度，特别是抗拉及抗弯强度，以及抗冲刷，抗振动等性能均有较大幅度的提高。目前国际上对这一复合材料强度计算的研究，大多是从

弹塑性理论出发，假定纤维成行排列，研究由于受荷后的变形、拔出而产生的强度变化。这一假定与复合材料的实际情况尚有一定距离，因此只限于理论分析。此外，以混合物法则和纤维间隔理论，用统计数学方式，通过大量试验资料求出钢纤维混凝土的强度经验公式。本书将重点介绍这一方法。

1. 混合物法则

钢纤维在水泥砂浆或混凝土中的作用，是利用纤维在基体里的粘着力传递荷载，其强度计算，常用“混合物法则”。混合物法则是假定纤维的方向与应力方向一致，因此复合材料的应力为纤维应力和基体应力的总和。如 N_c , N_f , N_m 分别代表复合材料，纤维和基体荷载，由混合物法则得

$$N_c = N_f + N_m$$

亦可写成 $R_c A = R_f A_f + R_m A_m$

$$\text{或 } R_c = R_f V_f + R_m V_m$$

式中 R_c 、 R_f 、 R_m ——分别为复合材料、纤维和基体材料的强度，

A ——面积，

V_f 、 V_m ——为纤维和基体对复合材料的体积百分数。

上式可改写为

$$R_c = R_m(1 - V_f) + R_f V_f \quad (2)$$

以上是混合法的主要公式。

如取与应力方向一致的一根纤维进行分析，纤维在基体中的作用，可分为以下四个阶段。

第一阶段：纤维和基体都处于弹性变形阶段，基体受应力，产生了弹性变形，首先对纤维产生界面切力，因端部无