

纤维混凝土 的研究与应用

赵国藩 黄承逵 主编

大连理工大学出版社

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会
纤维混凝土委员会成立及学术交流会 论文集

纤维混凝土的研究与应用

赵国藩 黄承逵 主编

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

纤维混凝土的研究与应用

Xianweihunningtu De Yanjiu Yu Yingyong

赵国藩 黄承逵 主编

大连理工大学出版社出版发行

邮政编码: 116024

大连海运学院印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32

印张: 10 1/2

字数: 269 千字

1992 年 12 月第 1 版

1992 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—1000

责任编辑: 韩 露

封面设计: 周雪明 姜严军

责任校对: 连 政

ISBN 7-5611-0702-1/TU·13

定价: 8.00 元

前 言

为了适应我国纤维混凝土学科发展的需要，经中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土学会批准，纤维混凝土委员会于1991年10月8日正式成立。纤维混凝土委员会的成立必将进一步促进我国纤维水泥与纤维混凝土理论研究和工程应用的发展，标志着我国纤维混凝土技术发展进入了一个新的阶段。

纤维混凝土是国际上近年来发展很快的新型复合材料，以其优良的抗拉、抗弯、抗剪、阻裂、耐冲击、耐疲劳等性能，而广泛应用于公路、机场、隧洞、桥梁、水工、建筑、军事工程和各种建筑制品等领域。多年来，国内许多科研和工程单位在纤维混凝土理论研究和工程应用方面做了许多工作。例如，在中国工程建设标准化协会和全国钢筋混凝土标准技术委员会的支持与领导下，由大连理工大学和哈尔滨建筑工程学院等单位组织编写了《钢纤维混凝土试验方法》、《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》两本推荐性规范，现在正在报批过程中；中国建材科学研究院和苏州混凝土水泥制品研究院在玻璃纤维水泥制品和石棉纤维水泥制品等方面进行了大量的研究开发工作。这使我国在上述领域的某些研究工作接近和达到国际先进水平。然而，从纤维混凝土和纤维水泥制品技术发展总的水平上看，我国同世界先进水平的差距还是很大的，摆在我国广大工程技术人员面前的任务是艰巨的，希望通过我们坚持不懈的努力，使我国纤维混凝土技术的发展达到一个新的水平。

在纤维混凝土委员会成立大会上，还进行了广泛的学术交流。交流的内容涉及纤维混凝土和纤维水泥制品的力学性能、耐久性、结构性能和工程应用研究和应用的最新发展，以及钢纤维生产技术等，以钢纤维混凝土的研究应用为主，也包括了其它纤维水泥

复合材料的研究应用。现将这些论文编辑出版，希望这些论文对我国纤维混凝土技术的发展起一个抛砖引玉的作用。由于编辑时间较为仓促，来不及精选和反复修改，因此书中可能有某些缺点和错误，希望读者予以批评指正。

本书由赵国藩、黄承逵主编，王璋水、安玉杰、文明秀参加部分论文的审阅及校阅工作。在出版和编辑工作中得到大连理工大学出版社的大力支持，在此深表谢意。

编 者

1991年10月20日

目 录

纤维混凝土的材性

钢纤维高强混凝土的力学特性与强化机理的研究	孙 伟 (1)
乱向短钢纤维增强混凝土的静态直接拉伸本构模型研究	蒯田杨 王文安 邓 训 (14)
钢纤维混凝土抗折强度及配合比设计	王璋水 (29)
混合纤维增强水泥混凝土的混杂效应	许彬彬 张 琪 (42)
钢纤维混凝土梁在冲击荷载下的动力响应	金芷生 王璋水 申光前 庞 运 (50)

纤维混凝土的耐久性

钢纤维混凝土的耐腐蚀性	黄承逵 (61)
混合纤维水泥材料及其制品耐久性的研究	叶启汉 陈桂琴 (78)
钢纤维混凝土耐久性的研究	赵鲁光 李思寿 (88)
关于研究钢纤维混凝土的耐久性问题	胡 昌 (93)

纤维混凝土结构性能

装配式框架钢纤维混凝土齿槽节点的试验研究	
----------------------	--

.....	章文纲	程铁生	(101)
SFRC 箱形拱桥拱圈高度探讨			
.....		蒙 云	(117)
钢纤维混凝土薄层路面结构荷载试验研究			
.....		蒙 云	(125)
钢纤维混凝土叠合构件			
.....	林长青	彭少民	(138)
配筋钢纤维混凝土构件裂缝宽度计算的理论模式			
.....	赵继章	贡金鑫	(146)
钢纤维混凝土与普通混凝土叠合构件的受弯性能			
.....	张志刚	赵国藩	黄承逵
			(154)

纤维混凝土的应用和发展

钢纤维混凝土结构与施工规程编写要点			
.....	赵国藩	黄承逵	(168)
纤维增强水泥复合材料的新进展			
.....		沈荣熹	(180)
新型的高性能纤维混凝土—砂浆渗浇纤维混凝土的发展			
.....	赵国藩	秦明乐	(200)
发表中等和高纤维含量钢纤维混凝土			
.....		沈蒲生	(208)
连续纤维增强塑料棒作预应力筋的预应力混凝土结构的发展			
.....	安玉杰	赵国藩	(216)
钢纤维混凝土刚性防水屋面应用技术研究			
.....		陈圣奎	(228)
高聚物复合 SFRC—Ⅰ 防水防潮材料的研制与应用			
.....		迟长生	(240)
GRC、SFRC 自应力刚性防水材料的应用研究			
.....	迟长生	刘 芳	刘 炜
			(250)

喷射早强钢纤维混凝土加固丰台立交桥	李启棣 吴淑华 何亚雄 孙俊武 (265)
F. C. 在土木工程中应用及其发展	李士恩 (273)
硅粉钢纤维混凝土在水工建筑上应用	林宝玉 卢安琪 (282)
局部增强钢纤维混凝土预制长桩工程应用实例	卢良浩 (288)
耐热合金钢纤维浇注料应用研究	宁志善 马庆山 (294)
钢纤维混凝土桥面设计应用与调查分析	罗保恒 (301)
SFRC—I 防水、防潮材料在工程上的应用	刘炜 翟立国 迟长生 (309)

钢纤维生产技术

冷却条件对熔抽钢纤维性能影响的研究	蒙启明 张如斌 任中生 (317)
-------------------	-------------------

钢纤维高强混凝土的力学特性与强化机理的研究

孙 伟
(东南大学)

[摘要] 本文主要研究了钢纤维增强 C50~C90 高强混凝土的抗压、劈拉、抗弯初裂、抗弯极限强度和抗弯韧性, 研究了钢纤维高强混凝土的疲劳特性并与不掺钢纤维的情况进行了对比。通过分析界面区 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的取向指数和取向范围、晶体尺寸和晶体尺寸曲线限度及显微硬度随基材不同的变化规律, 讨论了界面微观结构与宏观力学行为的关系及钢纤维与不同强度等级水泥基材间的界面力学特性。为钢纤维高强混凝土的结构设计提供依据。

一、前 言

钢纤维混凝土 (SFRC) 已成功地用于军事、水利、建筑、矿山等各个领域, 在防爆结构、矿山溜井、抗震结构、路面、桥面、机场道面等工程和杆、管、桩、枕等方面均产生了良好的技术经济效果。它目前已成为研究最多、应用最广的水泥基复合材料^[1,2,3,4]。但由于通常所用的 SFRC 是普通强度的, 纤维与基材间界面粘结差, 纤维的强度作用未能充分发挥, 更适应不了大跨、薄壁等特种结构的要求。为此, 本课题通过材料组成和结构的调整与改善, 研究了静载力学行为和动载耐疲劳性能, 为发展钢纤维高强砼提供性能参数。

二、试验材料及方法

(一) 试验用材料

水泥: 525#普通硅酸盐水泥, 比重 3.1, 江南水泥厂生产。

钢纤维: 方直纤维, $l_{sf}=25\text{mm}$, 纤维长径比 $l_{sf}/d_{sf}=60$, 马鞍山矿山设计院生产。扭曲型纤维, $l_{sf}=60$, 长径比 $l_{sf}/d_{sf}=60$, 宜兴闸口金属纤维厂生产。

细集料: 细度模量 2.42, 比重 2.66, 级配合格。

粗集料: 最大粒径 15mm, 级配 5~15mm, 连续级配。

高效减水剂: 三聚氰氨系列 JSM, 减水率 20%, 南京栖霞山外加剂厂生产。

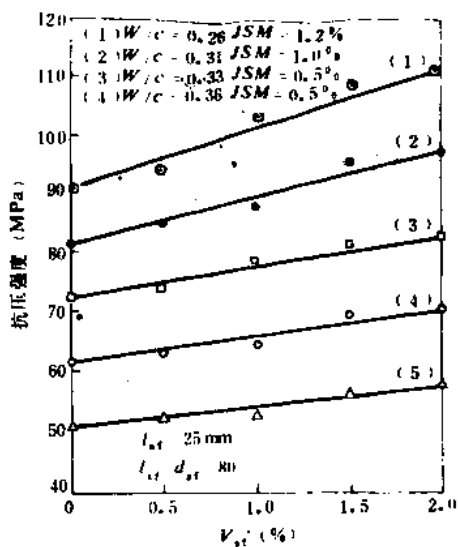
(二) 试验方法

采用 X 射线和显微硬度分析方法, 逐层逐点研究了钢纤维与高强水泥基界面区 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的取向性、平均尺寸、显微硬度的分布与变化规律, 确定界面区范围、性状与特征。采用拔出试验法, 测试了钢纤维与水泥基的界面力学特性。通过三点加荷方式和 X-Y 自动记录仪, 研究了钢纤维高强砼的力学性能。采用电液伺服疲劳试验机测试了钢纤维高强混凝土和高强混凝土的疲劳性能。

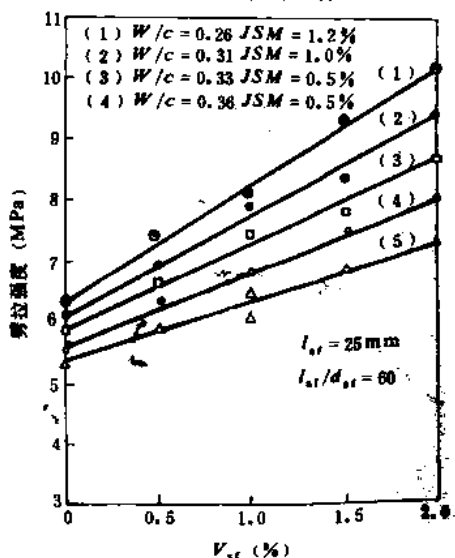
三、试验结果与分析

(一) 基材强度与纤维体积率对静载力学行为的影响

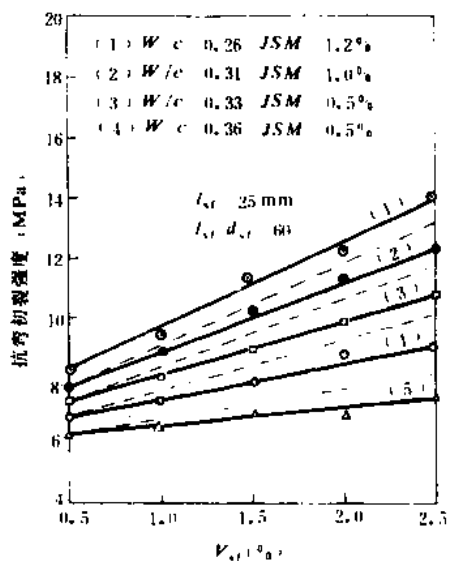
当钢纤维性能一定时, 影响 SFRC 力学性能的主要因素是混凝土基材的特性。在无其他外掺料的情况下, 高强混凝土基材的强度主要受水灰比的影响。水灰比的降低是通过掺入不同数量高效减水剂 JSM 来实现的。水灰比值又直接关系到纤维与基材间界面结构性状、界面力学行为和整体性能。本文通过调整高效减水剂用量, 配制了 5 个强度等级的高强水泥基材即 C_{50} , C_{60} , C_{70} , C_{80} , C_{90} , 分别与 V_{sf} 由 0~2% 的钢纤维复合后, 用标准方法测试



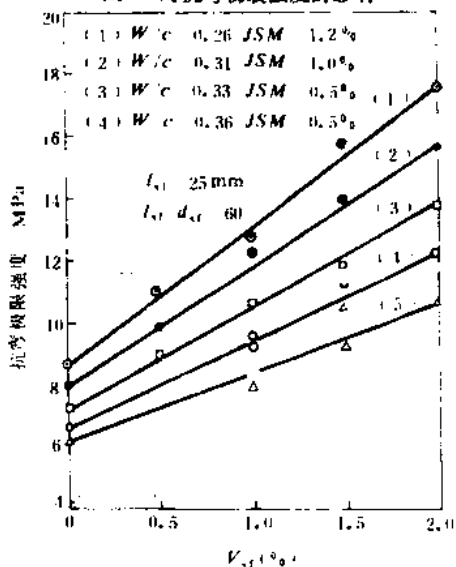
(a) 对抗压强度的影响



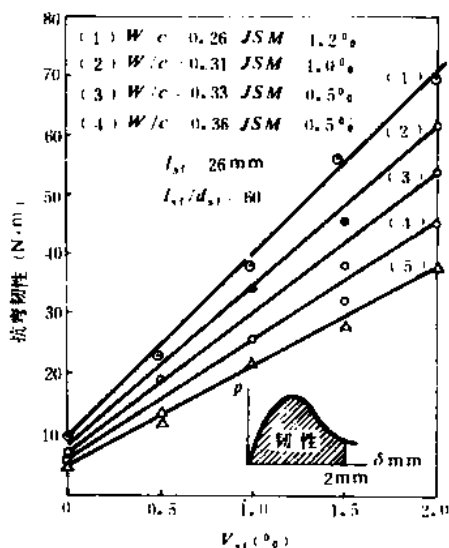
(b) 对劈拉强度的影响



(c) 对抗弯初裂强度的影响



(d) 对抗弯极限强度的影响



(e) 对抗弯韧性的影响

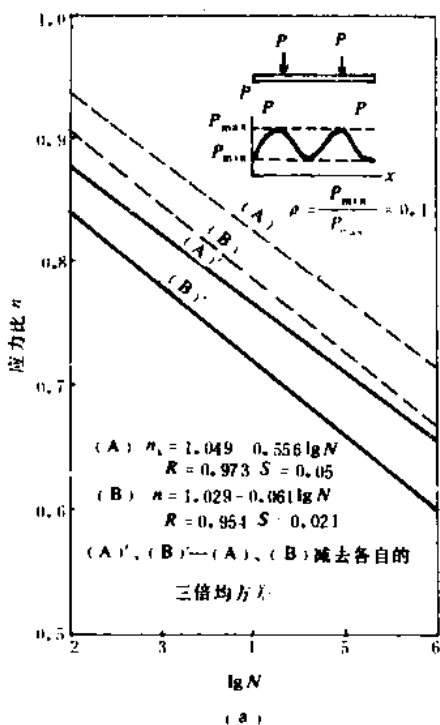
图1 高强水泥基材和 V_{st} 对 SFRC 力学行为的影响

了静载力学性能, 试验结果如图1所示。试验结果表明, 当 V_{st} 由 0~2%, 各力学行为均随 V_{st} 增大而提高。但各图中 (1)、(2)、(3)、(4)、(5) 曲线的斜率不同, 随高强混凝土基材强度的提高, 各项性能提高的幅度也相应增大。即当高强混凝土基材一定时, SFRC 各项力学性能指标与 V_{st} 基本上成线性关系, 与普通 SFRC 十分相似, 但各点的数值有明显差异。当 $V_{st}=0$, W/c 由 0.36 下降到 0.23 时, 除抗压强度有显著提高外, 其他性能指标的增长均十分有限, 其韧性的差异则更小。当掺入钢纤维之后, 钢纤维高强砼的性能则随混凝土基材强度的提高而增长。因此, 钢纤维与高强混凝土基材复合是配制高性能水泥基复合材料的重要技术途径之一。

(二) 钢纤维高强混凝土的疲劳性能

疲劳过程实际上是裂缝引发、扩展、回复、再引发、再扩展、

再回复以至破坏的循环发展过程。每个过程都将引起裂缝宽度和裂缝高度产生变化,变化的幅度与基材特性、界面形貌有关,也就是说,与原有裂缝源的尺度、数量及重复荷载作用下阻止裂缝引发与扩展的能力有关。本文对钢纤维高强混凝土的 $n-\lg N$ 曲线和疲劳次数与疲劳强度的关系进行了试验研究,并与不掺纤维的情况 ($V_{sf}=0\%$ 的高强混凝土基材) 做了对比,试验结果见图 2。图 2 表明,当疲劳次数 $N=10^6$ 时, (A)、(A)'、(B)、(B)' 式的应力比依次为 0.716、0.655、0.663、0.60,表明在高强水泥基材中掺入钢纤维后,应力比有明显提高(见图 2 (a))。当应力比相同,如取 0.7, (A) 与 (B)、(A)' 与 (B)' 的疲劳次数依次为 186×10^4 、 24×10^4 、 15×10^4 、 2.29×10^4 。故在其他条件不变时,掺与不掺钢



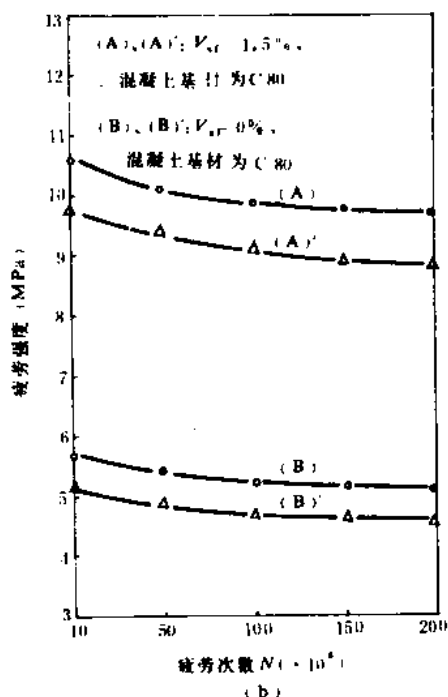


图2 钢纤维高强混凝土与高强混凝土的疲劳性能

纤维其疲劳次数可相差一个数量级。图2(b)还表明, (A)、(A)'、(B)、(B)'的疲劳强度随疲劳次数增长的变化规律基本相同, 均随疲劳次数的增长而有所下降。但其疲劳强度的数值却显著有别, 在高强混凝土中掺入钢纤维后, 疲劳强度可提高85%以上。如图2(b)所示, 当 $N = 2 \times 10^6$ 时, (A)、(A)'的疲劳强度依次为9.63MPa和8.81MPa, (B)、(B)'为5.14和4.64MPa。实验结果充分证实了, 由于钢纤维对高强混凝土的阻裂效应, 对提高高强混凝土的疲劳性能有独特的效果。

表 1 水灰比对 SFRC 界面力学行为的影响

纤维外形	JSM (%)	$\frac{W}{C}$	$\frac{c}{S}$	界面平均粘 结强度/MPa	界面粘结刚 度/MPa·m ⁻¹	纤维脱粘与拔出 所做的功/N·m
方直纤维	1.5	0.23	1:1.5	7.44	209	1.98
	1.2	0.26	1:1.5	5.93	162	1.52
	1.0	0.31	1:1.5	4.97	128	1.29
	0.5	0.33	1:1.5	4.17	98	0.91
	0.5	0.36	1:1.5	2.82	71	0.62

(三) 基材强度对界面力学行为的影响

综上所述, 在高强混凝土基材中掺入钢纤维后显著提高了抗压、劈拉、抗弯初裂、抗弯极限强度和韧性, 其疲劳性能的提高尤为显著。究其原因主要与界面粘结特性有关。而界面粘结特性又直接受 W/c 的影响。当 W/c 由 0.36 至 0.23, 界面平均粘结强度、界面粘结刚度、纤维脱粘与拔出所做的功, 均随 W/c 下降而提高。 W/c 由 0.36 降至 0.23 时, 上述界面力学行为依次提高到 263%、294%、319%。界面力学行为的提高, 表明混凝土在结构形成过程中, 钢纤维限制与约束了裂缝的引发, 是减少与缩小裂缝源尺度和数量的基本原因。在受力后, 特别在疲劳过程中, 纤维有效地阻止和限制了裂缝的扩展, 缓和了裂缝尖端应力集中程度。特别重要的是, 由于钢纤维与水泥基材的紧密结合, 增大了钢纤维对水泥基材的影响范围, W/c 越低, 界面粘结越强, 纤维对基材的影响范围也越大, 阻裂能力和增强、增韧能力也相应提高。

(四) 钢纤维对高强混凝土的强化机理

本文通过掺入高效减水剂 JSM, 在保证良好工作性前提下降低了混凝土基材的 W/c , 提高了混凝土的强度。在这种情况下, 当其他条件不变时, W/c 是影响钢纤维与水泥基材的界面粘结和 SFRC 诸力学行为的主要因素。界面粘结的宏观力学行为与界面区微观性状与结构密切相关。就钢纤维增强低、中强度的混凝土

表 2 砼基材强度对钢纤维与基材的界面区 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 特性的影响

砼基材强度/MPa	$\frac{W}{C}$	测点与纤维表面的距离/ μm	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 取向指数 I_a	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 取向范围/ μm	界面区 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体平均尺寸/ nm	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体尺寸曲线限度/ μm
50	0.36	0	6.17	25~30	214.2	25~30
		5	2.05		165.0	
		10	1.23		134.5	
		15	1.21		101.0	
		20	1.18		72.0	
		25	1.02		68.0	
		30	1.03		63.0	
		35	1.01		64.0	
60	0.33	0	5.24	20~25	163.5	20~25
		5	1.97		132.7	
		15	1.16		114.8	
		20	1.12		91.6	
		25	1.07		58.0	
		30	1.01		56.0	
		35	0.98		59.0	
			1.01		53.8	
70	0.31	0	3.26	15~20	132.7	15~20
		5	1.35		105.0	
		10	1.09		86.4	
		15	1.06		48.0	
		20	1.01		46.5	
		25	1.03		48.8	
		30	0.94		47.2	
		35	0.99		46.3	
80	0.26	0	1.11	10~15	105.0	10~15
		5	1.08		74.8	
		15	1.01		39.6	
		20	0.99		40.1	
		25	1.02		39.1	
		30	0.97		33.7	
		35	1.03		40.2	
			1.01		37.4	
90	0.23	0	1.08	6~11	75.4	6~11
		5	1.02		40.5	
		10	0.99		40.1	
		15	0.03		39.3	
		20	1.01		38.4	
		25	0.99		39.7	
		30	0.98		37.4	
		35	1.01		30.8	