

本书出版受国家自然科学基金项目(5167082603)资助

Experiments and numerical  
simulation of recycled fiber reinforced concrete

# 废弃纤维再生混凝土试验与 数值模拟

◎ 周静海 陈平 王凤池 康天蓓 著

中国建筑工业出版社

本书出版受国家自然科学基金项目（5167082603）资助

# 废弃纤维再生混凝土 试验与数值模拟

周静海 陈 平 王凤池 康天蓓 著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

废弃纤维再生混凝土试验与数值模拟/周静海等著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-112-22468-5

I. ①废… II. ①周… III. ①再生混凝土-材料试验

②再生混凝土-数值模拟 IV. ①TU528.59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 165336 号

本书介绍了废弃纤维再生混凝土的应用研究情况, 主要内容共 8 章, 分别是: 绪论、废弃纤维再生混凝土强度尺寸效应、长期持续荷载下废弃纤维再生混凝土徐变破坏、废弃纤维再生混凝土抗裂性能、废弃纤维再生混凝土断裂性能、废弃纤维再生混凝土梁的裂缝发展及宽度计算、大挠度下废弃纤维再生混凝土板的薄膜效应、废弃纤维再生混凝土的细观模拟。

本书适用于建筑材料专业相关研究人员使用, 也可供大中专院校建筑材料相关专业师生参考使用。

责任编辑: 万 李

责任设计: 李志立

责任校对: 党 蕾

## 废弃纤维再生混凝土试验与数值模拟

周静海 陈 平 王凤池 康天蓓 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{1}{4}$  字数: 275 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-22468-5

(32343)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

随着经济的高速发展以及人民生活水平的提高，人类受到人口膨胀、资源、能源日渐匮乏以及环境恶化等问题的威胁，人与自然的可持续发展成了一个亟需解决的问题。十九大报告中提出“必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，坚持节约资源和保护环境的基本国策，像对待生命一样对待生态环境”。因此对于建筑产业来说，绿色、清洁的发展方式是未来的大趋势。

近年来，为满足经济及社会需求，越来越多的老旧建筑被拆除，伴随而来的是大量建筑废弃物，目前的处理方式不仅侵占土地资源，还带来了生态环境的污染。与此同时，随着化工行业的发展，纤维在满足日益增长的日常生活需要的同时，也带来了不可小视的环境问题。本书的研究对象——废弃纤维再生混凝土是将废弃混凝土和废弃纤维相结合的新型绿色混凝土，它不仅可以缓解骨料供求关系，还可以解决废弃混凝土和废弃纤维带来的环境与社会问题，达到“以废治废”的目的。

本书首先介绍了废弃纤维再生混凝土的研究现状及其主要研究内容；第2章到第5章分别从尺寸效应、徐变破坏、收缩性能、抗裂性能及断裂性能等方面分别介绍了废弃纤维再生混凝土的材料基础性能、相关理论与研究成果；第6章和第7章介绍了废弃纤维混凝土构件中梁的裂缝发展及宽度计算和板的薄膜效应；第8章介绍了废弃纤维再生混凝土的细观数值模拟，为从本质上解析废弃纤维再生混凝土的破坏机理奠定基础。

本书的研究得到了国家自然科学基金项目（5167082603）的支持。参与具体研究工作的还有研究生杨健男、郭易奇、程攀、张广祺、王晓天、边晨、李泽等，本书的内容体现了他们一部分的研究成果。本书在编写中，参考了许多公开发表的学术论文、著作、规范等，并尽量将其列入参考文献中。以上，作者在此一并表示衷心的感谢。

由于本书作者的时间和水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，恳请专家和读者批评指正！

2018年8月  
于沈阳建筑大学

# 目 录

1 绪 论 .....	1
1.1 废弃纤维再生混凝土的提出 .....	1
1.2 再生混凝土的研究现状 .....	2
1.3 纤维混凝土的研究现状 .....	4
1.4 本书研究内容 .....	6
2 废弃纤维再生混凝土强度尺寸效应 .....	8
2.1 混凝土强度尺寸效应理论 .....	8
2.1.1 Weibull 统计尺寸效应理论 .....	8
2.1.2 能量释放的尺寸效应理论 .....	10
2.1.3 Carpinteri 尺寸效应理论 .....	11
2.2 废弃纤维再生混凝土的强度试验 .....	12
2.2.1 试验材料 .....	12
2.2.2 废弃纤维再生混凝土制备 .....	14
2.2.3 试验设备及方法 .....	15
2.3 废弃纤维再生混凝土抗压强度尺寸效应 .....	19
2.3.1 抗压强度试验现象 .....	19
2.3.2 尺寸换算系数与尺寸效应度 .....	21
2.3.3 尺寸效应理论拟合 .....	23
2.3.4 临界尺寸与临界强度 .....	23
2.4 废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应 .....	26
2.4.1 劈裂抗拉强度试验现象 .....	26
2.4.2 尺寸换算系数与尺寸效应度 .....	28
2.4.3 尺寸效应理论拟合 .....	30
2.4.4 临界尺寸与临界强度 .....	31
2.5 废弃纤维再生混凝土轴心抗压强度尺寸效应 .....	32
2.5.1 轴心抗压强度试验现象 .....	32
2.5.2 尺寸换算系数与尺度效应度 .....	33
2.5.3 尺寸效应理论拟合 .....	34
2.5.4 临界尺寸与临界强度 .....	35
2.6 峰值应变尺寸效应分析 .....	36
2.6.1 尺寸效应度 .....	36
2.6.2 弹性模量尺寸效应分析 .....	38
2.6.3 泊松比尺寸效应分析 .....	39

2.7 本章小结 .....	39
<b>3 长期持续荷载下废弃纤维再生混凝土徐变破坏 .....</b>	<b>41</b>
3.1 混凝土徐变理论 .....	41
3.1.1 混凝土徐变机理 .....	41
3.1.2 不同应力水平下的混凝土徐变 .....	42
3.1.3 混凝土徐变的影响因素 .....	43
3.2 试验方案 .....	46
3.2.1 试验配合比设计 .....	46
3.2.2 徐变试验 .....	47
3.2.3 超声波检测方法 .....	49
3.3 废弃纤维再生混凝土高应力下徐变研究 .....	49
3.3.1 90%、95%应力水平下的徐变分析 .....	49
3.3.2 85%应力水平下的徐变分析 .....	54
3.4 废弃纤维再生混凝土高应力下损伤规律 .....	56
3.4.1 超声波速试验结果 .....	56
3.4.2 损伤变量随应力的变化规律 .....	58
3.4.3 损伤变量随时间的变化规律 .....	61
3.4.4 废弃纤维再生混凝土损伤后的弹性模量结果分析 .....	62
3.5 本章小结 .....	64
<b>4 废弃纤维再生混凝土抗裂性能 .....</b>	<b>66</b>
4.1 混凝土抗裂性能评价方法 .....	66
4.1.1 平板法约束开裂试验 .....	66
4.1.2 圆环式约束开裂试验 .....	67
4.1.3 单轴约束试验 .....	67
4.2 试验方案 .....	67
4.2.1 试验配合比设计 .....	67
4.2.2 约束条件下抗裂性能试验 .....	68
4.2.3 自由收缩条件下收缩性能试验 .....	69
4.3 约束条件下抗裂性能 .....	70
4.3.1 废弃纤维再生混凝土初裂时间 .....	70
4.3.2 废弃纤维再生混凝土开裂情况分析 .....	72
4.3.3 废弃纤维对抗裂性能影响机理 .....	75
4.4 自由条件下收缩性能 .....	76
4.4.1 废弃纤维再生混凝土早期收缩试验 .....	76
4.4.2 废弃纤维再生混凝土长期收缩性能 .....	77
4.4.3 废弃纤维再生混凝土性能改善机理 .....	78
4.5 本章小结 .....	80
<b>5 废弃纤维再生混凝土断裂性能 .....</b>	<b>81</b>
5.1 双K断裂准则及断裂模型 .....	81



5.2	试验方案	83
5.2.1	试验分组	83
5.2.2	试验方法及测试内容	83
5.3	废弃纤维再生混凝土断裂试验结果分析	84
5.3.1	废弃纤维体积参量对断裂性能的影响	84
5.3.2	再生骨料取代率对断裂性能的影响	87
5.3.3	纤维长度对断裂性能的影响	90
5.3.4	缝高比对抗裂性能的影响	92
5.3.5	废弃纤维再生混凝土断裂机理	95
5.4	本章小结	95
6	废弃纤维再生混凝土梁的裂缝发展及宽度计算	96
6.1	梁正截面受弯试验方案	96
6.1.1	试件设计与制作	96
6.1.2	试验加载装置	97
6.1.3	试件加载过程	98
6.2	梁正截面受弯试验现象	99
6.3	基于分形理论的裂缝发展	103
6.3.1	分形理论	104
6.3.2	裂缝发展的分形特征	105
6.3.3	再生骨料与废弃纤维对分形维数的影响	105
6.3.4	分形维数与最大裂缝宽度	108
6.3.5	废弃纤维和再生骨料对裂缝宽度的影响	108
6.4	裂缝宽度计算方法研究	110
6.4.1	中、美、欧三种裂缝宽度计算公式	110
6.4.2	废弃纤维和再生骨料影响的计算参数	111
6.4.3	废弃纤维再生混凝土梁缝宽度计算公式	112
6.5	本章小结	113
7	大挠度下废弃纤维再生混凝土板的薄膜效应	115
7.1	薄膜效应原理	115
7.2	堆载试验方案	117
7.2.1	试件设计	117
7.2.2	加载方案	118
7.2.3	试验测量方案	119
7.3	考虑薄膜效应的承载力计算模型	120
7.3.1	钢筋应变	120
7.3.2	荷载—挠度曲线	123
7.3.3	承载力计算模型	127
7.4	废弃纤维再生混凝土板有限元分析	129
7.4.1	建立模型及网格划分	129

7.4.2	钢筋及混凝土应力云图 .....	130
7.4.3	板的荷载挠度曲线分析 .....	131
7.4.4	钢筋的荷载应变曲线分析 .....	131
7.5	本章小结 .....	133
8	废弃纤维再生混凝土的细观模拟 .....	134
8.1	混凝土细观随机骨料模型 .....	134
8.1.1	典型混凝土细观力学模型 .....	135
8.1.2	再生混凝土本构模型 .....	136
8.1.3	骨料模型的生成 .....	138
8.2	再生混凝土二维细观骨料随机分布模型 .....	140
8.2.1	再生混凝土的细观组成 .....	141
8.2.2	再生骨料二维随机分布模型 .....	142
8.3	再生混凝土单轴抗拉性能模拟 .....	144
8.3.1	再生混凝土单轴抗拉试验模拟 .....	144
8.3.2	再生骨料分布对再生混凝土抗拉强度的影响分析 .....	147
8.4	废弃纤维再生混凝土单轴抗拉性能模拟 .....	153
8.4.1	单轴抗拉性能模拟 .....	153
8.4.2	废弃纤维分布系数对废弃纤维再生混凝土抗拉性能影响 .....	158
8.5	本章小结 .....	162
	参考文献 .....	163



# 1 绪 论

## 1.1 废弃纤维再生混凝土的提出

随着城镇化进程的推进和房地产产业的持续发展,资源浪费、能源短缺、环境破坏等问题也日益凸显。长期以来传统建筑工业的生产方式基本上可以概括为高投入、高污染、低效益的粗放型生产方式,如果用混凝土的配合比来估算,每年至少消耗砂石 278.7 亿 t,水 27.9 亿 t,且生产这些集料也需要消耗大量的人力物力。同时,砂石作为混凝土的重要作组成部分必然会被大量使用,但是砂石作为自然资源,并不是取之不尽,用之不竭的,且质量良莠不齐,在我国某些地区质量较好的天然骨料已经所剩无几,这导致人们不得不开山取石,掘地掏砂,长此以往会给自然及生态环境带来一系列的问题,不符合可持续发展的长远规划,也不符合世界对资源、能源和环境协调发展的要求。

另外,建筑废料也在日益增加,其中绝大部分为拆迁重建所产生的废混凝土。除此之外,自然灾害也会产生大量建筑垃圾,其中绝大部分为废弃的混凝土。例如,于 2008 年发生的四川汶川 8.0 级大地震摧毁了很多住宅、医院等建筑,产生了大约 5 亿 t 的建筑垃圾,若按废弃混凝土占 40% 的比例来计算,保守估计会产生大约 2 亿 t 废弃混凝土,数量触目惊心。目前,对于废弃混凝土的处理,常用的方法有露天堆放或直接填埋,废弃混凝土在堆放过程中不仅占用大量的土地资源,浪费征地费用、运输费及处理费用不菲,而且若处理不当也极易出现粉尘污染等环境问题,造成二次污染。传统建筑行业从资源开发到拆迁过程如图 1-1 所示。



图 1-1 传统建筑行业从资源开发到拆迁废弃示意图

一方面是需要大量开采自然环境资源作为原料配制混凝土;另一方面是大量建筑垃圾不断产生、大量废弃混凝土处理困难。再生混凝土在这种情况下应运而生,废弃混凝土经过破碎成为再生骨料,然后参与混凝土的配制,这样不仅能解决自然资源短缺的困扰,减缓骨料供求紧张,还能解决废弃混凝土的处理问题,有利于保护环境,使混凝土从产生、使用到回收形成一个闭路循环。这种做法符合绿色节能的思想,节约资源,将废物重新利用,有利于保护环境。

自 1957 年聚丙烯工业化生产以来,科学技术的日益进步带动聚丙烯制品产业化水平的不断提高。目前,我国已发展成为聚丙烯制品的生产和消耗大国,聚丙烯产业得到了迅速发展与创新。由于聚丙烯具有优异的性能,因而被广泛应用于非织造布、服装面料、医用手术用品及民用卫生用品等领域。市场在对聚丙烯制品表现出巨大热情的同时,大量的废旧聚丙烯制品也不断被制造出来。迫于环境及资源的压力,近年来,世界各国都在积极寻找废弃纺织纤维材料的处理方法,并对废弃聚丙烯制品的再利用投入了巨大热情。现阶段,对于废弃聚丙烯纤维的处理主要有燃烧法、降解法及再生法三种方法。通过燃烧和降解方法处理的废弃聚丙烯纤维不仅需要很高的技术要求和生产投入,还会对环境造成污染。因此利用再生法对废弃聚丙烯纤维进行回收再利用将越来越受到人们的重视。这些废弃物中包括多种纺织材料,其中的丙纶材料,也就是聚丙烯纤维,具有密度小、耐酸碱、化学稳定性强的特点,将聚丙烯纤维作为增强纤维加入混凝土中可以提高混凝土的力学性能。

我国作为最大的发展中国家,每年都会在生产和应用中产生大量的建筑垃圾和废弃纤维,如果能完美的将两者结合并重新运用到建筑之中,可以产生巨大的经济效应和环境效应。所以,提出了废弃纤维再生混凝土的概念,不仅利于重新利用大量的建筑垃圾和废弃纤维,减少环境污染,还有利于解决再生混凝土的不足之处。

## 1.2 再生混凝土的研究现状

再生混凝土技术被认为是解决废混凝土问题的重要方法,此技术能有效解决大量废混凝土堆放处理时带来的生态破坏环境污染问题。而且再生混凝土替代天然集料既能减少天然集料的使用,从而减少对天然砂石的过度开采,降低对自然环境的破坏,又节省了建筑成本,节约资源。将废混凝土充分利用变废为宝,兼顾生态环境及社会效益,符合可持续发展的要求。

从一般意义上讲,将废弃的混凝土人工破碎、筛分、清洗后得到的骨料称为再生骨料或再生混凝土骨料(Recycled Aggregate, RA)。在混凝土骨料中其中的一部分用再生骨料代替的混凝土,称为再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC),简称再生混凝土(Recycled Concrete, RC)。用于制造再生骨料的原始混凝土称为基体混凝土。根据再生骨料粒径大小的差别,再生骨料粒径在 5~40mm 的称为再生粗骨料(Recycled Coarse Aggregate, RCA),骨料粒径在 0.5~5mm 的称为再生细骨料(Recycled Fine Aggregate, RFA)。一般意义上的再生混凝土为再生粗骨料混凝土。

20 世纪 50 年代以来,众多发达国家就对如何有效处理和利用废弃混凝土展开了大量的试验研究。这些发达国家在研究与利用再生混凝土方面都有较快的发展,不仅从科研方面进行了深入的研究,还结合实际的应用情况,制定了相应政策来规范和促进再生混凝土产业的发展。美国为促进废弃混凝土的循环再利用,从科研等各个方面对这种材料进行了深入的研究,并且在 1980 年制定了相关法律《综合环境反应、补偿与责任法》。据有关数据显示,再生混凝土已经被美国首先使用在 20 多个州的公路建设当中,还有可能在更多的州推广再生混凝土的使用。荷兰和丹麦也是对再生混凝土的研究和应用起步较早的欧洲国家,早在 20 世纪 80 年代,荷兰首先制订了再生混凝土的相关规范,该规范主要针对于

素混凝土、普通钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土中掺加再生混凝土骨料的情况。丹麦将再生混凝土这种材料运用于工程实践当中,仅在1990年这一年中,全国因拆除废弃建筑物产生的1220万t废弃混凝土中,约百分之六十七以上被回收再利用。在亚洲地区,韩国是较早对再生混凝土这种材料进行试验研究和再利用的国家,在对建筑垃圾与固体废弃物方面进行深入的研究后,韩国对再生混凝土的利用及质量做了相关规定,先后出台了《建筑废弃物再生促进法》和《再生骨料最大值数以及杂质含量限定》。日本是一个国土面积狭小、自然资源相对匮乏的岛国,因此日本十分重视对废弃混凝土的研究再利用,制订了《再生集料和再生混凝土使用规范》,规定要求将建筑垃圾及固体废弃物经加工与处理后制成再生骨料,以代替混凝土粗/细骨料。

相较于西方发达国家在再生混凝土方面的研究和应用,我国对再生混凝土的研究相对晚一些。随着近些年城市化建设进程的迅猛发展,在消耗和浪费了大量的能源和资源的同时,还对砂石等自然资源的需求量与日俱增,对混凝土原材料资源的缺乏也是日益显著。与此同时,由于新建和拆除的建筑物数量增多,其相应的建筑垃圾数量也明显增大,环境污染与社会发展之间的矛盾也是日益尖锐。因此,我国政府也开始重视对建筑废弃垃圾进行有效再利用与研究;国内的各大知名院校和相关科研机构,如同济大学、华中科技大学、东北大学、清华大学、哈尔滨工业大学等都先后对再生混凝土各项性能进行了深入的研究。目前大多数研究主要集中在再生混凝土的基本性能(包括抗压强度、抗拉强度及弹性模量等)、再生混凝土骨料生产的经济性、骨料质量的控制、合适的配合比设计及其耐久性能的研究等方面,并取得一定的成果。

与普通混凝土相比,再生混凝土在材料性能方面相对较差,导致再生混凝土在结构性能方面较普通混凝土相比具有不同程度的降低,这是再生混凝土结构及构件在实际工程中广泛应用遇到的最大障碍。再生混凝土在材料性能方面表现出的相对较差主要是由再生混凝土存在较多的界面结构。再生混凝土界面结构与生产过程中再生骨料的剥离程度有关,对于完全剥离的再生骨料而言,其外部包裹的旧水泥石在制备过程中已经完全脱落,几乎等同于天然骨料,用它制备的再生骨料混凝土只包含完全剥离的再生骨料与新水泥的界面,其界面结构与天然骨料混凝土的结构相似。再生粗骨料中,大部分为未完全剥落的、部分表面包裹着旧砂浆的再生粗骨料。这类再生粗骨料在制备再生混凝土的过程中,再生骨料混凝土形成一个由原天然骨料与老旧砂浆界面和新旧水泥砂浆界面的双层界面,复杂的界面结构是造成再生骨料混凝土的力学性质不如天然骨料混凝土的主要原因。

为了深入地研究再生混凝土的性能,各国学者纷纷着手从细、微观尺度出发,从不同尺度(图1-2)展开研究并建立之间的联系,不仅可以观测细、微观结构的形貌、总结规律,从本质上揭示再生混凝土展现出来的性质,而且可以使再生混凝土技术的发展摆脱经验性的束缚。由于水泥的水化生成物常具有特定的形貌特征,因此可通过对水泥微观结构的电镜扫描图像进行分析,在电镜下观察水泥硬化浆体的微观结构,可看出不同的成分常常具有不同的形貌特征,如硅酸钙凝胶常常表现为云状、颗粒状、网状等形状,氢氧化钙晶体为六角板状、层板状,钙矾石晶体为棒针状等,分割定位出部分具有代表性的水化产物形貌,对于分析混凝土的微观结构对宏观上表现出来的性能的影响具有重要意义。结合图像分析处理技术,可以测定水泥基体、界面过渡区的水化产物、水化程度、颗粒形貌、晶粒尺寸、晶粒排列以及基体的孔隙率变化等结构参数,以此来分析对混凝土宏观性能产

生影响的主要细、微观结构，并提出改善方式及研究方向。

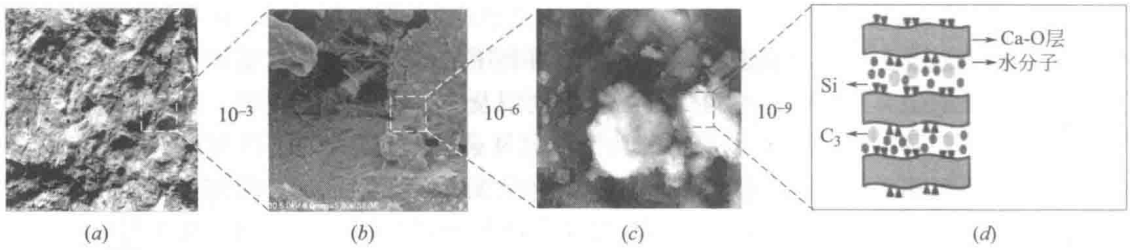


图 1-2 不同尺度下的混凝土结构

(a) 混凝土截面；(b) 水泥石界面结构；(c) 水化产物；(d) 原子结构

在耐久性方面，再生混凝土随龄期的发展而出现的收缩开裂、断裂等现象已成为国内外专家学者的研究热点。各种原因造成的裂缝直接影响混凝土在实际工程中的应用和耐久性能。混凝土结构及构件的裂缝主要有两类，一类是荷载裂缝或结构性裂缝；另一类是变形裂缝。其中，变形裂缝约占混凝土结构物出现裂缝几率的 80% 左右。从理论上讲，混凝土的收缩抗裂性能与结构的致密性有关，可以认为混凝土结构越密实其抗裂性越强，即抵抗外界各种环境作用的能力也就越强，耐久性越好。混凝土结构及构件一旦出现微小裂缝的产生或扩展，就为渗透、冻融、化学侵蚀及钢筋锈蚀等作用提供了可能，渗漏、保护层剥落、混凝土碳化、持久强度降低等问题便会相继出现，情况严重的甚至会危及建筑物的正常运营或缩短建筑物的寿命，因此，由于混凝土裂缝的产生和扩展而导致结构物耐久性降低是不可避免的。

### 1.3 纤维混凝土的研究现状

纤维混凝土 (Fiber Reinforced Concrete, FRC) 是纤维增强混凝土的简称，它是水泥浆、砂浆或混凝土为基体，以金属纤维、无机非金属纤维、合成纤维或者天然有机纤维为增强材料组成的水泥基复合材料。自开始采用水泥混凝土作为建筑材料的时候，就发现其具有抗拉强度低、变形量小、易发生脆性破坏等缺点。随着时代的发展和社会的进步，人们对混凝土材料的性能要求越来越高，故科研人员就开始探索将各类纤维掺入混凝土中以提高其各项性能的试验研究。

从 20 世纪 50 年代开始，世界上许多工业发达国家就开始致力于纤维混凝土的相关研究，并取得了显著的成就。其中得到较多运用且相关研究比较成熟的几种纤维混凝土分别是：钢纤维混凝土、石棉纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和碳纤维混凝土。合成纤维混凝土的研究及应用较纤维混凝土晚了十多年，1965 年聚丙烯纤维首次被作为混凝土掺和料应用到建造防爆建筑以及混凝土制品与工程中；美国多家公司在 20 世纪 80 年代初期，成功地运用表面处理技术将直径在  $23\sim 62\mu\text{m}$  范围内的尼龙、聚丙烯等单丝纤维均匀地分布在混凝土当中，试验结果表明：当纤维体积率为 0.05%~0.2% 时，纤维明显改善了混凝土的韧性。近几十年来，西方发达国家已经把纤维混凝土大量且广泛的投入到生产实践中。其中，美国混凝土总量的十分之一左右为纤维混凝土。

我国对纤维混凝土的研究起步较西方发达国家晚一些,相关研究开始于20世纪70年代中后期。虽然相关研究开始的较晚,但是发展速率较快,应用范围较广,而且成果斐然。我国在20世纪70年代首先对钢纤维混凝土展开研究,并在其后二十多年的时间里逐渐开始研究其他常见的合成纤维混凝土。在我国大量应用纤维混凝土的领域有:工业和民用建筑、桥梁工程、隧道工程、智能结构构件以及预制混凝土制品与构件等。新疆喀什七里桥、平顶山平东线姚孟段、广州东环高速公路、黑龙江佳木斯思邈立交桥、巴东长江大桥桥面铺装层等工程中都使用了纤维混凝土,不仅缩小了路面、桥面最大裂纹尺度,而且对工程的整体性都有很大的提高。在二滩水电站泄洪洞、三峡大坝、巴家咀水库溢洪道、富金坝船闸输水廊道以及滩水电站溢流坝堰面等工程中,纤维混凝土的使用不但能够满足结构强度要求,而且还满足挡水防渗,抵抗温度变化、水流冲刷及风化作用的要求。

目前我国对纤维混凝土的研究主要集中在以下几方面:选用不同的纤维掺入量,对比纤维混凝土的各项性能得出各种不同纤维的最佳掺量;研究纤维混凝土的宏观力学性能,如:抗压强度、抗拉强度、抗折强度及抗冲击强度等,以及纤维对结构延性、韧性及抗弯承载力的增强作用都是当前研究的重点。在混凝土中加入不同类型的纤维,其对混凝土的力学性能具有不同的影响;对纤维混凝土的内部结构的研究主要以宏观和细观为主,而对于纤维混凝土的微观孔结构研究甚少。

国内外学者对聚丙烯纤维在混凝土中的作用机理作了全面的研究分析。通过加入聚丙烯纤维明显改善了水泥砂浆的抗压强度、耐磨性指标和脆性指数,并且耐磨性和抗折强度两者之间具有良好的线性递增关系。通过进一步微观试验,分析了聚丙烯纤维对水泥砂浆的增强作用机理。试验结果表明:聚丙烯纤维对水泥水化过程的影响不突出,但是在聚丙烯纤维与水泥砂浆界面形成聚合物过渡界面,有效地改善了聚丙烯纤维与水泥砂浆基体之间的粘结性能。

Zhang Huili, Tian Kanliang 等人对含聚丙烯纤维的混凝土进行了弯曲疲劳性能与机理研究。试验结果表明:加入聚丙烯纤维可以有效提高了混凝土的疲劳强度和使用寿命,可获得对水泥砂浆界面过渡区复合补强效果。最佳聚丙烯纤维体积比掺量为0.6%,混凝土疲劳强度会随着纤维掺入量的增多而降低,在恒定应力水平下,较高的加载频率降低疲劳强度更显著。

苏晓藤等人试验研究表明:当聚丙烯网状纤维掺入量为 $0.7\text{kg}/\text{m}^3$ 时,纤维混凝土的立方体抗压强度大约提高了13.6%,但随着聚丙烯掺量的继续增加,混凝土抗压强度不再提高反而有下降趋势。

胡飞玲等人通过对14根聚丙烯纤维混凝土梁的三分点静力受弯加载试验,得出以下5个结论是:1)在混凝土中掺入聚丙烯纤维可以提高混凝土搅拌过程中的流动性、和易性和粘结性,提高施工工艺,减少混凝土内部空隙和微裂缝等自身缺陷;2)聚丙烯纤维混凝土梁的开裂荷载值大约提高了30%左右,有效地改善了混凝土梁的抗开裂能力;3)聚丙烯纤维混凝土梁在达到极限承载力之前,与普通混凝土梁相比其挠度较小,而破坏状态下时的挠度较大,说明提高其构件延性;4)聚丙烯纤维混凝土梁的受弯段裂缝高度与普通混凝土梁相比要低,裂缝数量有所增加,表面裂缝分布更加复杂,极限承载能力少许提高;5)利用有限元模拟分析结果与实际结果相吻合。

从上述研究结果来看,纤维具有改善混凝土内部缺陷,提高抗压强度、抗裂强度、疲



劳强度,抑制裂缝产生的突出作用效果。随着科学技术的发展,学者们逐渐重视应用计算机模拟软件对纤维混凝土的工作机理进行研究。唐春安等人在运用 MFPA<sup>2D</sup> 模拟纤维混凝土时,采用的方法是先将纤维混凝土试件划分网格,然后人为赋予某些单元骨料颗粒的材料特性,赋予某些单元水泥砂浆的材料特性,随后进行数值模拟计算。这种方法类似于抽象模拟,使划分网格将变得简单,但其不足之处就是没有考虑界面的影响。由于没有考虑界面,所以这种抽象模拟是否能够真实的反映纤维混凝土细观结构对其宏观力学性能的影响还有待于进一步的研究。此外,有文献针对钢纤维混凝土的细观结构及力学性能进行了计算机模拟研究。文献通过采用蒙特卡罗方法(Monte-Carlo Method)建立了钢纤维混凝土的随机骨料分布模型,通过有限元网格的自动剖分,从而在细观结构上将钢纤维混凝土视为二相复合材料,并且各相均满足弹脆性材料假设,材料参数取自试验测得的在钢纤维掺量不同情况下的硬化水泥浆体的弹性模量,以及粘结界面在不同垂直荷载和不同钢纤维掺量下的力学性能,最终实现计算机仿真模拟技术对钢纤维混凝土进行研究,得出了比较满意的混凝土  $F-\delta$  曲线(在几种不同工况下)。谢建斌从纤维的实际分布情况出发,根据随机数学和体视学原理建立纤维分布随机过程的数学模型。研究了纤维动态转移过程,编制钢纤维分布细观几何参数的动态实测计算机系统。同时还对纤维分布的细观几何参数和细观机理进行研究,模拟了纤维的三维分布。苑坤兴借助于三维骨料级配曲线演化而来的二维骨料级配公式——瓦拉文公式,运用蒙特卡罗原理及粒子动态混合算法研究聚丙烯纤维与水泥砂浆的界面过渡区,建立聚丙烯纤维与水泥砂浆界面过渡区的有限元模型,建立聚丙烯纤维与水泥砂浆界面过渡区的细观结构与宏观材料性能间的定量关系。

综上所述,纤维的加入对混凝土的工作性能具有积极作用。国内外最早最全面研究的是金属纤维,其中钢纤维应用最多,它作为增强材料加入混凝土后其各项性能都有很好的提升,但是却有造价高、易腐蚀、变形能力差和分布不均匀的缺点。废弃纤维再生混凝土是将废弃的聚丙烯纤维裁剪成一定长度的纤维束后,按照一定的体积比例掺入到再生混凝土中,配制而成的新型混凝土材料。相对钢纤维比较而言,聚丙烯纤维又有具防水性好、耐腐蚀、强度相对较高、韧性好、成本价格低、直径小、弹性模量高、与水泥基材料黏结力强等优点,克服了金属纤维的缺点,因此具有较好的发展前景。

## 1.4 本书研究内容

对于废弃纤维再生混凝土的材料力学性能、构件性能及不同酸碱、冻融环境下的耐久性能,可以参阅作者的另一部专著《废弃纤维再生混凝土及构件》。本书主要论述了废弃纤维再生混凝土尺寸效应、抗裂性能、断裂性能等的试验研究及细观数值模拟。

第2章介绍了废弃纤维再生混凝土强度尺寸效应,给出适用于废弃纤维再生混凝土的强度尺寸换算系数;探究再生骨料取代率、废弃纤维掺入量和强度等级对废弃纤维再生混凝土强度尺寸效应的影响;分别对 Weibull、Bažant 和 Carpinteri 提出的统计尺寸效应理论和试验数据进行拟合对比,提出尺寸效应理论中参数的建议值,并预测不同配合、设计变量下废弃纤维再生混凝土的临界尺寸和临界强度。

第3章对废弃纤维再生混凝土在持续高压应力作用下的徐变、徐变破坏进行了试验研究。对比分析了在相同应力水平下,再生骨料替代率、废弃纤维掺入量对混凝土徐变变



形、徐变破坏产生的影响。通过废弃纤维再生混凝土在高应力徐变过程中的超声波速计算损伤变量,并通过损伤变量计算徐变过程中混凝土弹性模量的衰减程度,探究高应力下徐变对废弃纤维再生混凝土损伤造成的影响。

第4章介绍了废弃纤维再生混凝土的抗裂性能。通过测定环形约束条件下的开裂试验来评价废弃纤维再生混凝土的抗裂性能,并根据试验数据得到废弃纤维再生混凝土的开裂稳定龄期及裂缝宽度等随龄期的变化情况。同时采用自行研制的收缩试验装置对不同长度及不同体积掺量的废弃纤维对再生混凝土收缩性能进行了研究,得到了自由条件下废弃纤维再生混凝土的收缩率随龄期的变化情况。

第5章中基于双K断裂准则对预制切口梁进行断裂试验。混凝土的断裂性能逐渐成为评价混凝土抵抗原始裂缝不稳定发展等材料性能的重要参数。双K断裂准则的三点弯梁断裂试验仅需对三点弯梁进行一次性加载,避免了使用基于双参数模型试验过程中的循环加载与卸载,且对试验仪器的精度要求不高。

第6章的研究内容分为两部分,第一部分:利用分形理论验证分析废弃纤维再生混凝土梁在外力作用下的裂缝发展情况,利用分形维数分析再生骨料和废弃纤维这两个变量因素对废弃纤维再生混凝土梁裂缝发展的具体影响情况;第二部分:对比中欧美三种混凝土设计规范中的规定和区别,总结出适用于废弃纤维再生混凝土梁的裂缝宽度计算方法。

第7章,考虑薄膜效应分析了废弃纤维再生混凝土板在大变形下的破坏模式。通过虚功法对废弃纤维再生混凝土板的薄膜效应进行计算模型的分析,计算废弃纤维再生混凝土板在大变形时的承载力。通过ABAQUS对废弃纤维再生混凝土板的静力加载试验进行模拟,对模拟数据进行分析并与试验数据进行对比。

第8章介绍了废弃纤维再生混凝土的细观数值模拟,为从本质上解析废弃纤维再生混凝土的破坏机理奠定基础。本章从普通混凝土细观骨料模型的建立入手,接着类比介绍了再生混凝土细观骨料模型的建立。提出了再生骨料和废弃纤维的均匀分布系数,建立骨料和废弃纤维分布模型,研究其对废弃纤维再生混凝土性能的影响规律。

## 2 废弃纤维再生混凝土强度尺寸效应

著名科学家莱昂纳多·达芬奇早在 15 世纪提出尺寸效应的概念，他认为：“材料和粗细完全相同的两根绳子强度不会一样，短的那根更结实”，这是对尺寸效应最早的描述。随后尺寸效应被科学家 Gonnerman 率先应用于研究混凝土。混凝土的力学性能不仅仅与配合比、骨料级配、配筋率有关，还与试件尺寸密切相关。研究表明混凝土的力学性能受尺寸效应影响较大，因此试验强度不在仅仅取决于材料本身的性质，还受到结构的几何尺寸的影响。随着经济的发展，工程结构向大跨度和超大型方向发展，如海洋钻井平台、跨海大桥、水坝等，由于此类结构受限于试验条件（如加载方式、反力机构）无法进行真实结构的系统试验，只能参考试验结果来指导设计实际结构，而这种方法的适用性及参考价值是设计人员需要考虑的问题，也使混凝土强度的尺寸效应研究更具现实意义。

### 2.1 混凝土强度尺寸效应理论

Griffth 于 19 世纪 20 年代将断裂力学带入对混凝土尺寸效应的研究中，随着研究的深入，尺寸效应理论日趋成熟。目前研究工作主要集中于以下三种尺寸效应理论，分别是由 Weibull、Bažant 和 Carpinteri 提出的统计尺寸效应理论、基于能量释放准则的尺寸效应理论和基于裂纹分形特征的尺寸效应理论。

#### 2.1.1 Weibull 统计尺寸效应理论

统计尺寸效应理论由 Weibull 于 1939 年提出，该理论在 Tippett 的极值理论基础上，融入一维链状结构的最弱连接模型概念，后由 Von mises、Frechte 等人的整理，形成了数学表达式。研究显示，结构尺寸越大其内部缺陷就越多，尺寸效应的效果就越明显。

Weibull 经典的统计理论基于概率分析提出，该理论的基本假设：（1）材料中任一个小的单元达到极限强度，结构就会失效；（2）每个单元的失效都是独立的；（3）材料的强度极限是随机分布的。

##### 1. 结构最弱连接模型

Weibull 的最弱键模型最直观的解释方式，链条结构如图 2-1 所示。



图 2-1 Weibull 分布模型图

链条结构中每个单元都具有相同强度，并有相同的失效概率，每个单元生效的概率应该为  $1 - P_i(\sigma)$ ，根据联合概率分布理论，具有每个单元的链条要存活其概率为：

$$1 - P_f(\sigma) = [1 - P_i(\sigma)]^N \quad (2-1)$$

式中  $P_f(\sigma)$ ——链条失效概率。

该理论同样适用于一维长杆状结构,长杆结构可分解成  $N$  个单元,设  $N=V/V_r$ ,  $V$  表示长杆结构体积,  $V_r$  表示单元体积,对式 (2-1) 两端取对数,推导出:

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp[-NP_1(\sigma)] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{V_r}\right)P_1(\sigma)\right] \quad (2-2)$$

引入浓度函数代入式 (2-2),则长杆失效概率为:

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp[C(\sigma)V] \quad (2-3)$$

浓度函数  $C(\sigma)$  表示强度低于应力  $\sigma$  的缺陷浓度:

$$C(\sigma) = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma_0}\right)^m \quad (2-4)$$

式中  $V_0$ ——参考体积;

$\sigma$ ——应力;

$\sigma_0$ ——与尺寸相关的应力值;

$\sigma_1$ ——与构成材料有关的应力域值,对于脆性材料,一般可取为 0;

$m$ ——Weibull 系数。

## 2. 拓展统计尺寸效应

对于某些非匀质单向受力构件的失效概率,需要用积分来求解,构件上任意一点的强度应力  $\sigma$  是与该点所处位置  $X$  和名义强度  $\sigma_N$  相关的函数,用  $\sigma[X, \sigma_N]$  表达,代入式 (2-3):

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\int_V C[\sigma(X, \sigma_N)] dV(x)\right\} \quad (2-5)$$

Freudenthal 将统计理论加以处理,使其适用于三向应力状态,其失效概率为:

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\int_V \frac{1}{V_0} \left[\frac{\tilde{\sigma}(\sigma, m)}{\sigma_0}\right]^m dV(x)\right\} \quad (2-6)$$

通过比较几何相似构件的不同特征尺寸  $D$  来定义尺寸效应,根据理论的基本假定,当材料性质变化时,定义构件的有效单轴向应力为:

$$\tilde{\sigma}(\sigma, m) = \sigma_N \tilde{S}\left(\frac{\tilde{X}}{D}, m\right) \quad (2-7)$$

式中  $\tilde{S}$  是构件相对坐标  $x_i/D$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和 Weibull 系数的函数;  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为笛卡尔直角坐标分量。

同时定义等效单轴向体积  $V_N$  为:

$$V_N = \int \left[\tilde{S}\left(\frac{\tilde{X}}{D}, m\right)\right]^m dV(x) \quad (2-8)$$

由式 (2-6)、式 (2-8) 可得构件失效概率及平均名义强度:

$$P_f(\sigma) = 1 - \exp\left[-\frac{V_N}{V_0} \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (2-9)$$

$$\bar{\sigma}_{Nu} = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_N dP_f(\sigma) = \left(\frac{V_0}{V_N}\right)^{\frac{1}{m}} \bar{\sigma}_0 \quad (2-10)$$

式 (2-10) 可以推广为: