



# 超强韧性纤维混凝土的

# 性能及应用

俞家欢◇著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

超强韧性纤维混凝土的性能及应用/俞家欢著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 5  
ISBN 978-7-112-14197-5

I. ①超… II. ①俞… III. ①纤维增强混凝土-性能-研究 IV. ①TU528. 572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 058080 号

本书主要介绍了超强韧性纤维混凝土 (PP ECC) 的力学性能、配合比、微观结构、自修复性能等, 对超强韧性纤维混凝土构件的滞回性能及受力性能进行了重点分析。同时通过大量工程实例, 介绍了该类型材料在结构修复、加固中的应用方式及公路桥梁实际工程中的使用效果。

书中全面收集了相关的试验及工程图片, 对书中介绍的各种原理和方法进行了形象的诠释。本书可供广大从事高性能混凝土配制的研究人员, 以及从事建筑结构、道路桥梁修复、加固的工程人员使用。

\* \* \*

责任编辑: 郇锁林 万 李  
责任设计: 张 虹  
责任校对: 刘梦然 刘 钰

## 超强韧性纤维混凝土的性能及应用

俞家欢 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)  
各地新华书店、建筑书店经销  
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版  
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 $\frac{1}{4}$  字数: 363 千字  
2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月第一次印刷  
定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-14197-5  
(22275)

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)

## 序

混凝土是当今世界上用量最大的建筑材料之一，具有原料丰富、价格低廉、制备简单、造型方便等众多优点，但是存在收缩性大、抗拉强度低以及韧性低等自身固有缺点，在公路和桥梁的破坏上体现得尤为明显。因此，寻找到一种能够提高混凝土韧性和强度的方法，对交通、建工、机场、隧道、水利与军事工程的建设有巨大的技术经济意义。

为了克服混凝土的以上缺点，最有效的方法是向水泥基中掺加纤维。自 20 世纪 70 年代以来，纤维增强水泥复合基材料日益引起材料界与工程界的广泛重视，超强韧性纤维混凝土 ECC 正好弥补了这些缺点，可以充分利用其弹塑性阶段的多重饱和裂纹破坏现象，发挥其独有的可以“带伤”工作的性能。目前已经成为深受国内外工程界青睐的高科技建筑材料，而我国的交通建设和管理部门也一直关注该材料的发展。

本书作者俞家欢博士长期从事纤维增强水泥基复合材料的研究，尤其是在国内率先开始了对 PP ECC 的研发工作，积累了丰富的经验，取得了多项科研成果并获得了国内外同行的广泛认可。作者在超强韧性纤维混凝土的力学性能、韧性和耐久性等方面做了大量的试验和理论研究工作，内容包含 PP ECC 构件与结构、道路建设、桥面伸缩缝的免缝和修补等应用，对提高建筑和路桥结构的使用寿命有很大的帮助作用。尤其是产品化后的快补型 PP ECC 在应急抢险工程中，即使在  $-20^{\circ}\text{C}$  仍可以实现 1 小时内恢复交通，可以避免交通方面的灾难性事故发生。

《超强韧性纤维混凝土的性能及应用》一书逻辑性强，系统性好，语言通俗易懂，对从事纤维混凝土的研究、教学、生产和施工人员均有借鉴和参考价值。该书的出版，将对纤维混凝土科学与技术的进步和交通建设事业起到积极的促进作用。

鉴于该书的意义重大，本人特为之序。

中国工程院院士

赵国藩

# 前 言

根据我国工程建设发展的需要,在各工程领域更多地应用性能优良、价格低廉的纤维混凝土是未来的发展趋势。随着我国纤维生产技术的改进,产品质量的提高,生产规模的扩大,纤维品种的引进以及自主开发能力的提高,纤维的数量和质量在未来将能够满足发展的需要。

但在我国的土木工程界,超强韧性纤维混凝土至今仍处于大多数人“听说过而未见过”的局面,尤其对于 ECC 更是如此。

ECC 俗称可弯曲的混凝土,是由密歇根大学 Li. V. C 教授发明的一种重量轻,并且更具有耐久性的可弯曲材料,这种用改性有机纤维替代常规混凝土中粗骨料的全新理念,使得脆性混凝土可转变为具有超强韧性的材料。虽然 ECC 在干缩、耐磨、疲劳及耐久性等方面还有待提高,但其仍具有不可估量的应用前景。

在作者进行的研究中,向 ECC 中添加的纤维主要有 PVA 纤维(聚乙烯醇, Polyvinyl Alcohol)和 PP 纤维(聚丙烯, Polypropylene)。

由于 PVA 纤维的生产对技术具有一定的特殊要求,并会对周边环境带来不利影响,使得我国的 PVA 纤维生产厂家目前为数仅有不多的几家。而且,虽有部分厂家能够生产有一定技术含量的 PVA 纤维,但质量稳定、性能优异的 PVA 纤维目前仅有日本能够生产,并且供货数量和时间都不能保证,这样会因工期不能保证而无法施工。但是,由于 PP 纤维价格低廉,门槛不高,PP 纤维的生产厂家在我国却数以千计。

目前的科学研究证实采用特殊改性的 PP 纤维进行 ECC 的生产并进行工程应用是完全可行的,并且价格与普通混凝土价格相比并未有明显提高。由作者率先在国内初步开始了产业化和科研成果的转化,积累了一定的经验,不仅为设计和施工提供依据,也为我国纤维混凝土事业的发展奠定了良好基础。

作者对 PP ECC 在路用、喷射和结构中的应用进行了深入的研究,尤其是产品化后的快补型 PP ECC 在应急抢险工程中,即使在 $-20^{\circ}\text{C}$ 仍可以实现 1 小时内恢复交通,可以根本性地解决市政工程、高速公路、飞机跑道等基础设施破损后需要修补所面临的巨大压力,避免灾难性事故发生。实践还证明,PP ECC 与常规的脆性水泥基复合材料的最大不同之处,即在于其是一种可以在一定程度上“带伤工作”的混凝土,通过其在公路上的应用,可以看出 PP ECC 路面兼具沥青和水泥两种路面的特征。

在超强韧性纤维混凝土的领域中,还有许多理论和应用问题尚待今后进一步研究开发,从提高使用性能、延长使用寿命、减少维护费用等综合效益和长期效益考虑,深信超强韧性纤维混凝土必将在我国的工程建设中发挥更加重要的作用,未来应用的前景将更加广阔。

由于现有理论、计算以及试验条件的限制,书中很多内容具有探索和创新性质。期待能够给读者带来帮助。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 普通混凝土的缺陷 .....	1
1.2 纤维混凝土的优点 .....	2
1.3 超强韧性纤维混凝土 .....	3
1.4 纤维混凝土的理论和应用研究 .....	5
1.4.1 纤维混凝土力学性能的研究 .....	5
1.4.2 纤维混凝土的应用研究 .....	6
<b>第 2 章 纤维混凝土弹性模量的细观力学求解方法</b> .....	7
2.1 弹性模量的计算公式 .....	7
2.1.1 球形夹杂四相复合材料模型 .....	7
2.1.2 弹性模量计算 .....	7
2.1.3 张量 $\alpha$ , $\beta$ 和 $\gamma$ .....	9
2.2 计算结果与讨论 .....	10
2.2.1 纤维混凝土弹性模量的理论求解 .....	10
2.2.2 理论解和试验结果比较 .....	10
2.3 纤维混凝土弹性模量影响参数分析 .....	11
2.4 小结 .....	12
<b>第 3 章 纤维混凝土配合比优化设计</b> .....	13
3.1 纤维混凝土配合比设计的要求和特点 .....	13
3.1.1 纤维混凝土配合比设计的要求 .....	13
3.1.2 纤维混凝土配合比设计的特点 .....	13
3.2 钢纤维混凝土配合比的优化设计 .....	13
3.2.1 材料和实验设备 .....	14
3.2.2 试件准备及试验过程 .....	17
3.2.3 分析与讨论 .....	17
3.3 超强韧性纤维混凝土配合比的优化设计 .....	20
3.3.1 液化机理与设计方法 .....	20
3.3.2 分析与讨论 .....	23
<b>第 4 章 超强韧性聚丙烯纤维混凝土</b> .....	24
4.1 聚丙烯结构和形态 .....	24
4.2 聚丙烯热学、力学和化学性能 .....	26
4.3 聚丙烯纤维及其作用 .....	27
4.4 聚丙烯纤维混凝土性能 .....	30
4.5 超强韧性聚丙烯纤维混凝土 .....	31

4.6	聚丙烯纤维混凝土在国内外研究与应用的现状 .....	34
4.6.1	聚丙烯纤维混凝土的发展简史 .....	34
4.6.2	聚丙烯纤维混凝土在工程中的应用情况 .....	34
<b>第5章</b>	<b>超强韧性纤维混凝土的微观结构分析 .....</b>	<b>36</b>
5.1	高性能水泥浆与骨料间过渡层的微观结构 .....	36
5.2	高性能水泥浆与纤维界面层的微观结构 .....	37
5.3	高性能聚丙烯纤维混凝土骨料的大中心质效应 .....	39
5.4	超强韧性纤维混凝土的固体缺陷微观结构 .....	40
<b>第6章</b>	<b>超强韧性纤维混凝土的自修复性能 .....</b>	<b>42</b>
6.1	耐久性问题 .....	42
6.1.1	混凝土的耐久性问题 .....	43
6.1.2	无裂纹的混凝土 .....	43
6.1.3	制造自修复纤维混凝土的方法 .....	44
6.1.4	应用弥散分布修补方法的关键条件 .....	45
6.2	自修复 ECC 材料的优化设计 .....	48
6.3	试验方案 .....	49
6.3.1	自修复质量、可靠性和重复性的量化 .....	49
6.3.2	材料组分 .....	50
6.3.3	干湿循环 .....	51
6.3.4	ECC 的预加载 .....	51
6.3.5	ECC 自修复性能的测量 .....	51
6.4	自修复后的性能 .....	52
6.4.1	裂纹特征 .....	52
6.4.2	ECC 的自修复 .....	52
6.4.3	自修复后 ECC 的力学性能 .....	54
6.5	自修复过程中物理模型和化学模型的建立 .....	56
<b>第7章</b>	<b>钢筋、FRP 筋增强 PP ECC 梁的滞回性能 .....</b>	<b>58</b>
7.1	钢筋增强 PP ECC 梁试验概况 .....	58
7.1.1	试验方案 .....	58
7.1.2	材料性能试验 .....	59
7.1.3	试件浇筑 .....	60
7.1.4	加载装置 .....	60
7.1.5	加载制度 .....	61
7.1.6	测点布置及数据采集 .....	62
7.1.7	试验中注意事项 .....	62
7.1.8	破坏现象描述 .....	63
7.1.9	试件荷载 ( $P$ )-位移 ( $\Delta$ ) 曲线结果分析 .....	67
7.1.10	骨架曲线分析 .....	69
7.1.11	承载力退化分析 .....	71
7.1.12	刚度退化特性分析 .....	72
7.1.13	耗能性能 .....	74
7.1.14	应变片分析情况 .....	76
7.1.15	小结 .....	76

7.2 钢筋增强 PP ECC 梁非线性有限元分析 .....	76
7.2.1 材料本构关系模型选取 .....	76
7.2.2 建模的方法和单元类型的选取 .....	80
7.2.3 钢筋增强 PP ECC 梁模型的建立 .....	80
7.2.4 计算结果分析 .....	81
7.2.5 小结 .....	87
7.3 钢筋增强 PP ECC 梁的恢复力模型 .....	87
7.3.1 钢筋增强 PP ECC 梁计算模型 .....	87
7.3.2 试件骨架曲线模型的确定 .....	88
7.3.3 钢筋增强 PP ECC 梁骨架曲线模型中特征参数的确定 .....	89
7.3.4 计算值骨架曲线模型与试验结果对比分析 .....	92
7.3.5 荷载 ( $P$ )-位移 ( $\Delta$ ) 曲线模型 .....	93
7.3.6 $P$ - $\Delta$ 曲线模型中有关刚度的确定 .....	94
7.3.7 模型计算 $P$ - $\Delta$ 曲线与试验结果对比分析 .....	94
7.3.8 小结 .....	96
7.4 FRP 筋材料 .....	96
7.4.1 FRP 筋的力学性能 .....	96
7.4.2 FRP 筋与混凝土的粘结性能及工作机理 .....	98
7.5 FRP 筋增强 PP ECC 梁滞回性能试验研究 .....	102
7.5.1 试验材料特性 .....	103
7.5.2 试验现象分析 .....	104
7.5.3 试验结果分析 .....	106
7.5.4 小结 .....	111
7.6 低周反复荷载下 FRP 筋 ECC 梁的承载力分析 .....	112
7.6.1 FRP 筋增强 PP ECC 构件正截面受力阶段 .....	112
7.6.2 FRP 筋增强 ECC 的正截面的极限承载力 .....	113
7.6.3 综合性能指标 .....	115
7.6.4 小结 .....	116
7.7 试验梁的有限元模拟计算 .....	117
7.7.1 建立模型 .....	117
7.7.2 计算结果分析 .....	118
7.7.3 骨架曲线比较 .....	119
7.7.4 小结 .....	120
<b>第 8 章 钢筋、FRP 增强 PP ECC 柱力学性能研究 .....</b>	<b>121</b>
8.1 钢筋增强 PP ECC 轴压短柱试验及结果分析 .....	121
8.1.1 试件设计及制作 .....	121
8.1.2 试验装置 .....	122
8.1.3 测点布置 .....	123
8.1.4 加载制度及方案 .....	123
8.1.5 试验加载方案 .....	124
8.1.6 钢筋增强 PP ECC 短柱破坏形态 .....	124
8.1.7 混凝土柱及 PP ECC 柱轴压破坏形态对比分析 .....	126
8.1.8 PP ECC 短柱轴压试验结果分析 .....	128
8.1.9 小结 .....	129

8.2	钢筋增强 PP ECC 长柱轴压试验	129
8.2.1	试件设计	129
8.2.2	试验测量装置及测点布置	130
8.2.3	轴压长柱破坏形态对比	130
8.2.4	试验结果分析	130
8.2.5	小结	134
8.3	钢筋增强 PP ECC 长短柱非线性有限元分析	134
8.3.1	钢筋混凝土 ABAQUS 非线性分析	134
8.3.2	钢筋增强 PP ECC 短柱的非线性有限元分析	135
8.3.3	钢筋增强 PP ECC 长柱的非线性有限元分析	138
8.3.4	小结	139
8.4	钢筋增强 PP ECC 长短柱的承载力计算	141
8.4.1	受压构件的构造要求	142
8.4.2	基本假定	142
8.4.3	钢筋增强 PP ECC 受压构件设计建议	142
8.4.4	钢筋增强 PP ECC 轴心受压长短柱正截面承载力	143
8.4.5	小结	146
8.5	FRP 筋增强 PP ECC 短柱性能试验研究	146
8.5.1	试件设计及制作	146
8.5.2	试验现象及破坏形态	148
8.5.3	试验曲线及对比分析	148
8.5.4	小结	151
8.6	FRP 筋增强 PP ECC 长柱性能试验研究	152
8.6.1	试件设计及制作	152
8.6.2	加载方法及数据采集	152
8.6.3	试验现象	153
8.6.4	试验结果及其分析	154
8.6.5	小结	158
8.7	FRP 筋增强 PP ECC 长短柱有限元分析	158
8.7.1	FRP 筋 PP ECC 轴压短柱非线性有限元分析	158
8.7.2	计算结果分析与比较	159
8.7.3	FRP 筋增强 PP ECC 轴压长柱非线性有限元分析	160
8.7.4	小结	161
<b>第 9 章</b>	<b>PP ECC 梁静力力学性能分析</b>	<b>166</b>
9.1	PP ECC 梁静力力学性能试验	166
9.1.1	试验方案	166
9.1.2	试验过程	167
9.1.3	试验现象	167
9.1.4	小结	170
9.2	试验结果分析	170
9.2.1	平截面假定应用于 PP ECC 梁的试验验证	170
9.2.2	荷载挠度曲线	171
9.2.3	纵筋配筋率的影响	173
9.2.4	PP ECC 梁与钢筋混凝土梁的比较	174



9.2.5 龄期的比较 .....	174
9.2.6 小结 .....	175
9.3 钢筋增强 PP ECC 梁的承载力计算与设计方法 .....	175
9.3.1 钢筋增强 PP ECC 梁的承载力计算 .....	175
9.3.2 钢筋增强 PP ECC 受弯构件设计建议 .....	183
9.4 FRP 筋增强 PP ECC 梁的承载力计算 .....	184
9.4.1 FRP 筋增强 PP ECC 构件正截面受力阶段 .....	184
9.4.2 FRP 筋增强 PP ECC 构件破坏形态 .....	184
9.4.3 FRP 筋增强 PP ECC 梁的正截面承载力 .....	185
9.4.4 小结 .....	188
9.5 PP ECC 梁非线性有限元分析 .....	189
9.5.1 钢筋增强 PP ECC 梁的非线性有限元分析 .....	189
9.5.2 FRP 筋增强 PP ECC 梁的非线性有限元分析 .....	191
9.5.3 小结 .....	193
<b>第 10 章 超强韧性喷射纤维混凝土研究与应用 .....</b>	<b>195</b>
10.1 喷射混凝土加固技术的发展现状 .....	195
10.2 喷射纤维混凝土的特点 .....	196
10.3 喷射纤维混凝土的变形性能 .....	197
10.4 喷射纤维混凝土施工工艺 .....	198
10.4.1 干式喷射 .....	198
10.4.2 湿式喷射 .....	198
10.5 影响喷射纤维混凝土性能的若干因素 .....	198
10.6 粘结强度 .....	201
10.6.1 新旧混凝土的粘结问题 .....	201
10.6.2 修补材料的选择 .....	202
10.6.3 喷射纤维混凝土产生粉尘和回弹的分析 .....	202
10.7 喷射纤维混凝土的施工质量控制 .....	204
10.7.1 严格控制原材料 .....	205
10.7.2 严格控制配合比 .....	205
10.7.3 优选施工工艺、制定科学合理的施工组织设计 .....	205
10.7.4 试喷作业 .....	206
10.8 喷射超强韧性纤维混凝土应用现状 .....	206
10.9 喷射超高韧性纤维混凝土 ECC 的发展方向 .....	209
<b>第 11 章 PP ECC 的快速修补及新路路面铺装应用 .....</b>	<b>210</b>
11.1 我国公路铺设及修补现状 .....	210
11.2 早强型快速修补用 PP ECC .....	211
11.3 PP ECC 的新型路面和桥面的铺装 .....	216
11.3.1 PP ECC 在桥梁上的应用 .....	216
11.3.2 PP ECC 在路面铺装中的应用 .....	216
<b>参考文献 .....</b>	<b>219</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>223</b>

# 第 1 章 绪 论

19 世纪 20 年代出现硅酸盐水泥之后,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 世纪中叶之后,伴随着钢铁的生产发展,出现了钢筋混凝土这种新型复合建筑材料,其中钢筋承受拉力,混凝土承受压力,发挥了各自的优势,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 年代开始出现了预应力混凝土,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,进而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提高,这一弱点也愈加突出。因此,长期以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。纤维增强混凝土是近年来研究最多和应用最广的重要途径之一<sup>[1]</sup>。纤维可有效地改善混凝土的物理性能和力学性能,所以自纤维混凝土问世以来一直受到国内外研究机构和学者的重视。本书的研究也是在这种趋势下进行的。

## 1.1 普通混凝土的缺陷

工程中常用的混凝土都不同程度的存在缺陷,从而限制了它的应用范围和效果。主要表现在以下几个方面:

### 1. 混凝土抗变形能力差

混凝土是水泥基复合材料,本质上属脆性材料,普通混凝土其抗拉强度只是抗压强度的 1/10~1/14,这使得大部分钢筋混凝土受弯构件在正常使用时处于开裂状态。由于裂纹的存在,周围介质(诸如空气、海水、污水等)中的有害物质渗透到混凝土内部,使钢筋逐渐锈蚀。裂纹的存在是降低混凝土耐久性的一个重要原因,而对于高强混凝土其脆性问题尤为突出,主要表现为其抗拉强度并不能随着抗压强度的提高而同步成比例的增大。高强混凝土的强度如表 1-1 所示<sup>[2]</sup>。

高强混凝土的强度 (MPa)

表 1-1

混凝土强度	符号	C50	C60	C70	C80
轴心抗压强度	$f_{ck}$	33.5	41.0	48.0	56.0
抗拉强度	$f_{tk}$	2.75	2.92	3.25	3.45
拉压比	$f_{tk}/f_{ck}$	1/12	1/14	1/15	1/16

从表 1-1 中可以看出, 高强混凝土的抗拉强度提高率明显低于抗压强度提高率。C80 高强混凝土的拉压比(抗拉强度与抗压强度的比值)降至 1/16, 拉压比值的降低意味着混凝土脆性的增大。混凝土的脆性断裂不仅使材料的高强效能不能得到充分发挥, 而且往往带来灾难性的工程事故, 所以改善混凝土的脆性成为许多研究者关注的问题。

### 2. 混凝土耐磨性差

混凝土硬化过程中会在表面形成一层水泥浆体面层, 其硬度较低。当面层受到反复摩擦、冲击时很容易破坏脱落, 影响混凝土的表面质量和耐久性, 从而引起结构不断破坏。通常表现为: 机械磨损破坏(如路面和厂房地坪的混凝土被反复摩擦、研磨和冲击而剥落, 影响车辆行驶)、冲刷磨损破坏和气蚀(空蚀)破坏(多出现在水工结构中)。

### 3. 混凝土抗渗性差

混凝土的拌合水供给水泥水化, 但水泥完全水化所需的水不超过水泥质量的 20%, 其余的水在硬化混凝土中形成孔隙, 包括毛细孔和胶孔。而毛细孔是水迁移的通道, 迁移水可能溶解某些水泥水化物从而破坏混凝土的内部结构。在温度为 0℃ 以下时水能在孔中冻结, 引起混凝土的冻融破坏, 因此混凝土中迁移水是混凝土破坏因素的载体。可以说渗透性差是除机械磨损外混凝土各种破坏的根源。提高混凝土的抗渗性可大大提高混凝土的耐久性。

## 1.2 纤维混凝土的优点

纤维混凝土又称纤维增强混凝土, 是以混凝土为基材, 在其中均匀掺入各种非连续的短纤维为增强材料而形成的水泥基复合材料。纤维加入水泥基体中, 主要有以下三种作用。

### 1. 提高基体的抗拉强度

混凝土内部缺陷是混凝土破坏的诱导因素, 欲提高强度, 必须尽可能地降低内部裂纹端部的应力集中程度, 限制缺陷的扩展。纤维混凝土中均匀而任意分布的短纤维在混凝土硬化过程中改变了混凝土的内部结构, 减少了混凝土内部的缺陷, 提高了混凝土材料的连续性。在混凝土受力过程中纤维与混凝土共同受力变形, 纤维的桥联作用使混凝土裂而不断并能进一步承受荷载。这些都有助于提高纤维混凝土的抗拉强度。

### 2. 阻止基体中原有缺陷(微裂纹)的扩展并延缓新裂纹的出现

在混凝土单位体积内均匀分布大量纤维, 纤维的加入犹如在混凝土中掺入巨大数量的微细筋, 起到支撑骨料的作用, 从而阻止粗、细骨料的沉降产生的离析。微裂纹在发展过程中必然遇到纤维的阻挡, 消耗了能量, 从而阻断裂纹扩展并起到抗裂的作用, 增强了混凝土的耐久性。

### 3. 提高基体的变形能力从而改善其韧性及抗冲击性

混凝土凝固后握裹水泥的高强纤维丝粘连成为致密的乱向分布的网状系统, 增强了混凝土的韧性。纤维与水泥基料紧密结合在一起, 极大地保持了混凝土的整体强度。混凝土受到冲击时纤维吸收了大量的能量, 从而有效地减少了集中应力的作用。纤维对水泥裂纹有搭接作用, 对分离的水泥块有牵连作用, 当纤维从水泥基体剥落时要消耗能量。

土木工程中应用的纤维增强复合材料大部分是钢纤维或有机纤维混凝土。纤维的应用

日益广泛。一般纤维的增强效果随纤维的体积含量  $V_f$  的增大而增大，但纤维体积过大，施工时纤维会结团，影响纤维的分散均匀。增强、增韧是包括混凝土在内的材料科学的发展方向。对于工程中应用的短切乱向纤维来说，纤维体积率、长径比、几何形状、分布与取向及纤维与混凝土之间的粘结强度都是影响纤维混凝土力学性能的主要因素，其中纤维的掺量受到纤维形状、长度等因素的影响。

### 1.3 超强韧性纤维混凝土

Forbes 杂志于 2009 年对聚乙烯醇纤维工程水泥基复合材料（以下简称 PVA ECC）进行了专题报道，认为其是将引起产业化革命的新型建筑材料<sup>[3]</sup>。但高昂的价格制约了 PVA ECC 在土木工程中的应用，因此有必要采用价格低廉的聚丙烯 PP (Polypropylene) 纤维生产出性能优异的工程水泥基复合材料。

超强韧性聚丙烯纤维增强水泥基复合材料（以下简称 PP ECC）作为一种新型的建筑材料，具有价格低、重量轻、韧性强、裂缝细密、耐久性强、抗冲击等优点。PP ECC 无粗骨料，密度在  $1600\text{kg/m}^3$  左右，为混凝土的  $2/3$ 。其内部纤维分布均匀，为各向同性材料，离散性小，性能稳定，与其他材料粘结性好。

目前国际上关于 PP ECC 的研究仅 Yang, En. Hua 和 Li, V. C 曾有提及<sup>[4]</sup>。在本书中作者采用表面进行了化合处理的改性聚丙烯 PP 纤维，通过增加其表面能和粗糙度，继而提高其与水泥基体的化学结合能，使 PP ECC 的弯曲韧性和抗冲击等力学性能得到极大改善。

PP ECC 的搅拌机出料如图 1-1 所示，标准立方体抗压试件破坏情况如图 1-2 所示。PP ECC 极限压应变为 0.015，约为混凝土的 3 倍；极限拉应变为 0.03，为混凝土的 60 倍。

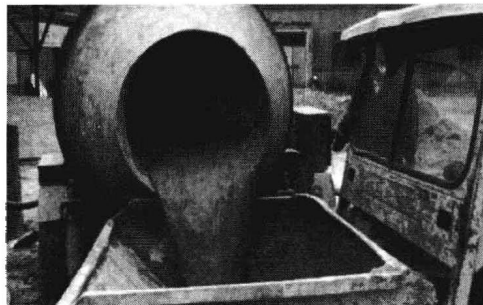
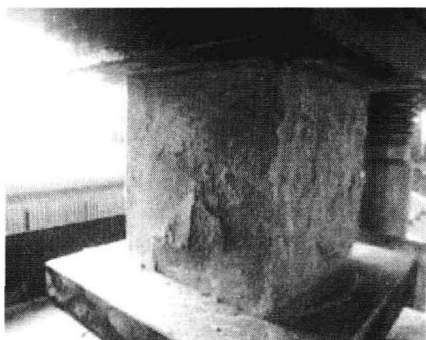
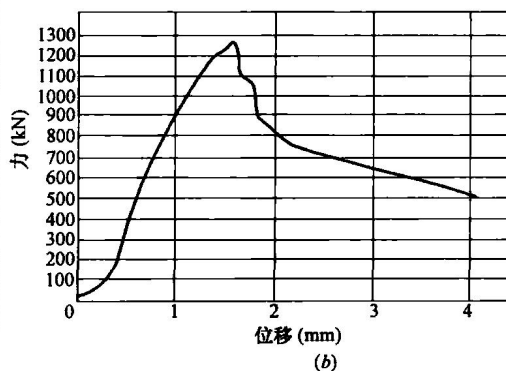


图 1-1 PP ECC 的搅拌机出料



(a)



(b)

图 1-2 立方体试块破坏情况及其荷载-位移曲线

(a) 2% 压应变试块破坏情况；(b) 力-位移曲线

PP ECC 单轴拉伸试验情况如图 1-3 所示。

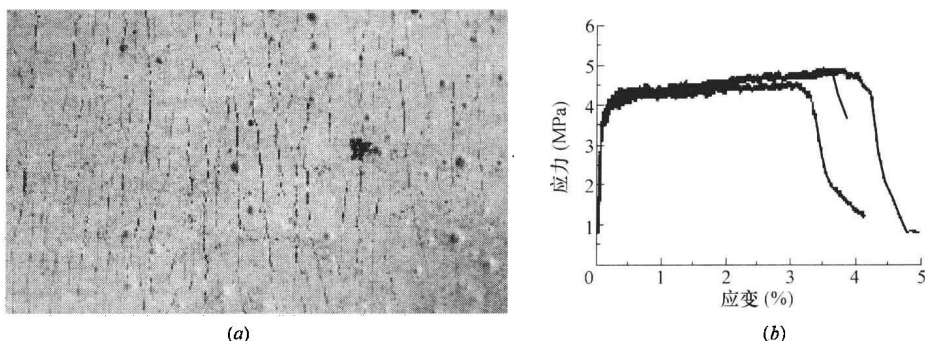


图 1-3 单轴拉伸实验及裂纹情况  
(a) 3%拉应变试件破坏情况；(b) 应力-应变曲线

PP ECC 抗冻指数为 90，满足《混凝土结构耐久性设计及施工指南》CCES 01-2004 中规定的大于 60 的标准。PP ECC 与普通混凝土试块冻融循环试验对比情况如图 1-4 所示。

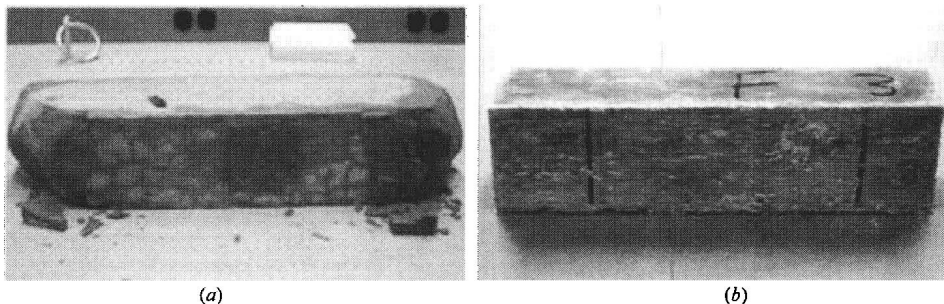


图 1-4 PP ECC 与普通混凝土试块冻融循环后的对比  
(a) 普通混凝土 210 次冻融循环后的现象；(b) PP ECC 300 次冻融循环后的现象

本书所研究的 PP ECC 拉伸应变和弯曲韧性均不低于 PVA ECC，但造价仅为 PVA ECC 的  $1/4 \sim 1/5$ ，能够控制在  $600 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。目前已经通过实验室测试阶段并进入大规模施工阶段。随着土木工程项目中 ECC 用量的增加，材料供货商能够大幅度降低价格，PP ECC 的成本将最终能够基本等同于普通混凝土的价格。

诸多纤维混凝土材料都具有抗裂以及提高韧性等特点，然而 PP ECC 以其超强的变形性能和抗裂性能出类拔萃。如图 1-5 所示为 PP ECC 薄板四点弯曲试验，试验中所采用的荷载近似于冲击荷载。在其作用下，PP ECC 薄板挠度很大，延性非常好，呈细密多重饱和裂纹开裂，表现出明显的应变硬化现象，体现了类似金属铝的超强韧性。

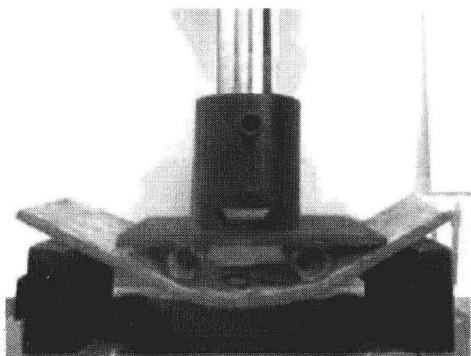


图 1-5 PP ECC 薄板弯曲试验

如图 1-6 所示为 PP ECC 大板弯曲试验，由作者的科研团队人员亲自踩踏，可以看出，PP ECC 具有远远超过普通混凝土的承载力和变形能力，而且裂缝开展情况良好，

可以始终控制在  $100\mu\text{m}$  以内，并在卸载后，大部分裂缝都恢复到肉眼很难看见的情况，对于传统混凝土材料或者普通纤维混凝土材料，达到这种效果是无法想象的。

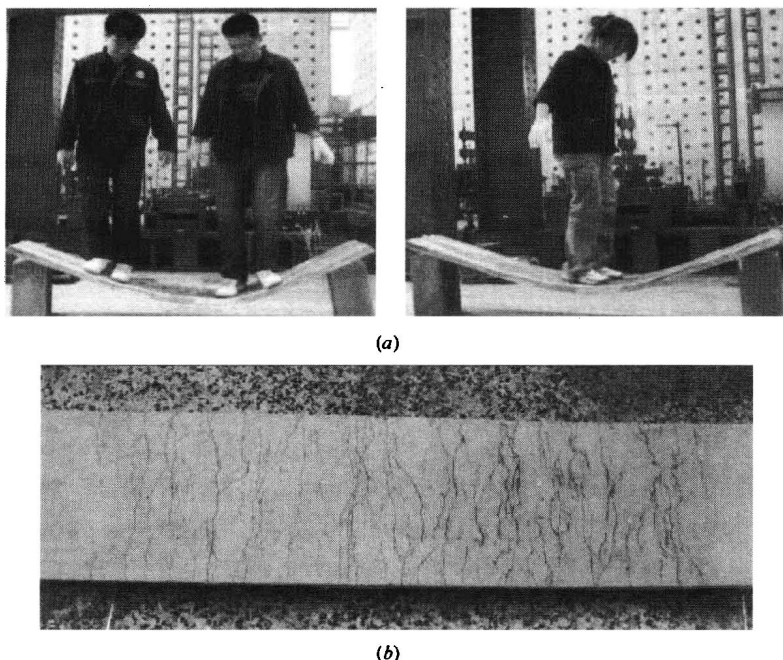


图 1-6 配筋 PP ECC 大板弯曲试验  
(a) 试验人员踩踏试件；(b) 试件裂纹

PP ECC 在改善结构构件的力学性能、变形能力、耗能能力、抗腐蚀性能等方面具有显著的效果，将其用做修补材料还能够与原材料之间产生超强的黏结，可实现快速、超薄层修补。该材料克服了传统混凝土存在的主要缺点，解决了工程界在混凝土应用中遇到的诸多难题，是混凝土材料理想的替代材料。目前，PP ECC 已初步实现材料的全部国产化，突破了价格的瓶颈，并且施工工艺简单，性能指标稳定，已经具备了大规模生产的能力，因此具有广泛的应用领域与前景。

## 1.4 纤维混凝土的理论和应用研究

纤维混凝土的理论研究有助于更好地认识纤维混凝土的增强机理，从而更有效地发挥两者复合后的材料性能，在此基础上得到高性能纤维混凝土。纤维混凝土的应用研究是把理论研究成果转化到实际工程应用的重要环节，目前纤维混凝土实际应用中仍存在纤维分散困难的难题，限制了高掺量纤维混凝土的实际应用。

### 1.4.1 纤维混凝土力学性能的研究

纤维混凝土的力学性能是其工程应用的最关键指标，所以是众多研究者所热衷的问题。目前主要研究了纤维混凝土的抗压、抗拉、抗折、抗冲击强度，纤维对混凝土断裂能和韧性的增强作用，混杂纤维对混凝土的增强作用等。

不同弹性模量的纤维对混凝土的力学性能的影响是不同的，随着弹性模量的降低增强作用也降低。一般认为纤维对混凝土的抗压强度提高很小甚至有可能降低，而对于抗拉、

抗折、抗冲击强度均有不同程度的提高。不同试验者得出的数据不尽相同,但结论都是相同的。加入纤维后混凝土的断裂能和韧性有较大提高<sup>[5,6]</sup>。清华大学的张君等<sup>[7]</sup>研究了单轴疲劳拉伸时纤维对混凝土裂纹桥联作用的变化情况,随载荷循环次数的增加纤维在基体内发生弹性滑移,从而降低了纤维与基体间的粘结力,所以界面粘结应力随载荷循环次数的增加而降低。

由于各种纤维的特性不同,决定了采用单一纤维增强水泥基体时,不能获得令人满意的效果。混凝土中掺入高模量纤维和高延性纤维,使两种甚至几种纤维在不同的受荷阶段和不同的结构层次发挥增强、增韧作用,可获得具有优异综合力学性能的混杂纤维混凝土。因而发展混杂纤维增强水泥基复合材料是一个很有潜力的方向。华渊等<sup>[8]</sup>研究了碳纤维、聚丙烯纤维,钢纤维、聚丙烯纤维以及耐碱玻璃纤维、聚乙烯纤维等混杂纤维混凝土的抗压、抗弯、抗拉强度随两种纤维体积率变化的规律。发现存在正负两种混杂效果,并获得了三种混杂纤维的正负混杂效应所对应的纤维体积率的临界值,且分析了正负两种混杂效应的原因。孙伟等<sup>[9]</sup>选用不同尺度的钢纤维、高弹涤纶纤维、低弹聚丙烯纤维,按二元或三元混杂来增强水泥基复合材料,系统地研究了纤维混凝土的收缩与抗渗性能,并提出相应的作用机理。不同尺度与不同性能的纤维能在相应结构层次上逐级阻裂和性能互补,纤维的混杂效应与纤维对水泥浆体的孔结构和孔隙率的改善密切相关,以合适的混杂比进行纤维混杂对混凝土的阻裂、抗渗有更好的改善效果。

复合材料的强度取决于非常复杂的损伤演化过程,包括:基体开裂、界面开胶、纤维断裂等许多现象。运用损伤和断裂理论可以从本质上分析纤维混凝土的性能。Mazar. J 等<sup>[10]</sup>提出用损伤力学来分析纤维混凝土构件在峰值载荷前的性能,用断裂力学来分析构件由峰值载荷加载至构件破坏的性能的分析方法。Mohamed 等<sup>[11]</sup>用连续介质损伤力学理论,利用二维四节点等参单元对构件破坏进行了有限元分析。综合考虑连续介质损伤力学和非线性断裂力学的模型能更好地分析纤维混凝土结构的反应。目前国内对纤维混凝土的细观力学分析较少,蔡敏等<sup>[11,12]</sup>用损伤与断裂理论进行了纤维混凝土细观力学的研究。

#### 1.4.2 纤维混凝土的应用研究

纤维混凝土的应用研究主要集中在以下两个方面:

(1) 改善搅拌工艺,增强纤维在混凝土内的均匀分散性。早在20世纪70年代美国就开始研究用于自动撕开缠裹成团的钢纤维,并以均匀而又可以调节的速度将纤维送进混凝土搅拌装置。国内也做过大量试验探索纤维混凝土搅拌工艺对纤维分散性的影响,选择最佳搅拌工艺<sup>[13-17]</sup>。改善纤维和基体材料的性能得到更高性能的纤维混凝土材料。

(2) 高掺量纤维混凝土的研究。比如砂浆渗浇钢纤维混凝土,将流动性砂浆注入事先放于模板中的纤维骨架中,试验显示由此方法得到的复合材料断裂韧度、强度、延性都有很大的提高<sup>[18,19]</sup>。

## 第 2 章 纤维混凝土弹性模量的细观力学求解方法

许多学者提出固体力学理论并建立近似模型以求解含有三维随机分布夹杂复合材料的弹性模量。复合材料整体的力学性能得到广泛地研究。Hori<sup>[20]</sup>借助经验常数给出不同骨料所组成纤维混凝土的弹性模量和实验数据。Voigt<sup>[21]</sup>给出复合材料弹性模量上限而 Reuss<sup>[22]</sup>给出弹性模量下限。Hashin 和 Shtrikman<sup>[23]</sup>采用更为优越的变分方法给出弹性模量的区间。Mori 和 Tanaka<sup>[24]</sup>用平均场概念分析复合材料细观特性。Eshelby<sup>[25]</sup>考虑夹杂形状对复合材料性能的影响。Mura<sup>[26]</sup>通过弹性力学理论和 Eshelby 夹杂法研究复合材料弹性模量和弹塑性力学表现。

Christensen 和 Lo<sup>[27]</sup>提出两相球状模型求解颗粒增强复合材料的剪变模量。该模型优点为夹杂和周围介质的应力、应变场的相互作用得到考虑。Lutfi<sup>[28]</sup>对钢纤维增强水泥基复合材料的物理和机械性能进行充分研究。Ahmed<sup>[29]</sup>研究聚合物纤维增强混凝土的力学性能并求解弹性模量等参数。本节应用 Mori-Tanaka 法和 Eshelby 等效夹杂法求解含有三种不同球状夹杂的纤维混凝土的弹性模量，理论解和试验数据吻合较好。

### 2.1 弹性模量的计算公式

#### 2.1.1 球形夹杂四相复合材料模型

假设无限大体  $M$  (水泥基体) 内有三种随机分布的球形夹杂 (细骨料、粗骨料和颗粒状纤维), 见图 2-1。其中砂为第一类夹杂, 占据空间  $\Omega_1 = \sum_{i=1}^N \Omega_{1i}$ , 弹性模量为  $C_1^*$  且体积率为  $f_1$ ; 石为第二类夹杂, 占据空间  $\Omega_2 = \sum_{i=1}^N \Omega_{2i}$ , 弹性模量为  $C_2^*$  且体积率为  $f_2$ ; 钢或聚合物纤维为第三类夹杂, 占据空间  $\Omega_3 = \sum_{i=1}^N \Omega_{3i}$ , 弹性模量为  $C_3^*$  且体积率为  $f_3$ 。三种夹杂被弹性模量为  $\bar{C}$  的基体 (水泥) 包围, 通过细观力学理论求解纤维混凝土的弹性模量  $\bar{C}$ 。

应用 Eshelby 等效夹杂法求解如图 2-1 所示的复合材料 (纤维增强混凝土) 的弹性模量  $\bar{C}$ , 在无限远处施加均匀应力  $\underline{\sigma}^0$ ,  $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$  和  $\Omega_3$  的应变分别为  $\underline{\epsilon}_1^*$ ,  $\underline{\epsilon}_2^*$  和  $\underline{\epsilon}_3^*$ 。

#### 2.1.2 弹性模量计算

夹杂和基体相对于均匀  $\underline{\sigma}^0$  的应力场扰动分别为  $\underline{\sigma}^{\Omega_1}$ ,  $\underline{\sigma}^{\Omega_2}$ ,  $\underline{\sigma}^{\Omega_3}$  和  $\underline{\sigma}^M$ , 由本征应变引起的应变场扰动  $\Delta\gamma$  为:

$$\Delta\gamma_{ij}(x) = - \int_{\Omega_1} C_{klmn} \epsilon_{mn}^*(x') \frac{1}{2} \{G_{ik,lj}(x-x') + G_{jk,li}(x-x')\} dx \quad (2-1)$$



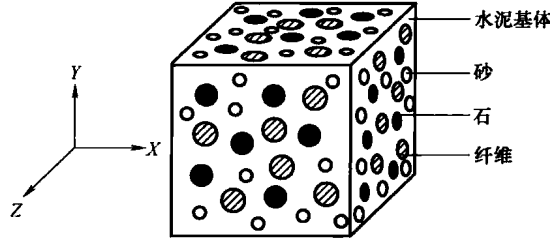


图 2-1 无限大体 M 中三相球形夹杂模型

其中的 Green 函数  $G_{ij}(x-x')$  表示点  $x'$  处沿  $x_j$  方向的单位力在点  $x$  处引起的沿  $x_i$  方向的位移分量。通过胡克定律和夹杂  $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ 、 $\Omega_3$  内的平均应力可以求得纤维混凝土内的弹性场。

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^{\Omega_1} \rangle = \underline{C}_1^* \{ \underline{C}^{-1}(\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^M \rangle) + \langle \underline{\Delta\gamma}_1 \rangle \} \quad (2-2)$$

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^{\Omega_2} \rangle = \underline{C}_2^* \{ \underline{C}^{-1}(\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^M \rangle) + \langle \underline{\Delta\gamma}_2 \rangle \} \quad (2-3)$$

$$\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^{\Omega_3} \rangle = \underline{C}_3^* \{ \underline{C}^{-1}(\underline{\sigma}^0 + \langle \underline{\sigma}^M \rangle) + \langle \underline{\Delta\gamma}_3 \rangle \} \quad (2-4)$$

符号  $\langle \rangle$  表示参数的平均值。  $\underline{\epsilon}_1^*$ 、 $\underline{\epsilon}_2^*$  和  $\underline{\epsilon}_3^*$  分别表示域中的本征应变，  $\underline{\Delta\gamma}_1$ 、 $\underline{\Delta\gamma}_2$  和  $\underline{\Delta\gamma}_3$  为由于本征应变  $\underline{\epsilon}_1^*$ 、 $\underline{\epsilon}_2^*$  和  $\underline{\epsilon}_3^*$  引起的应变扰动。夹杂中扰动应变的平均值为：

$$\langle \underline{\Delta\gamma}_1 \rangle = \underline{S}_1 \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle \quad (2-5)$$

$$\langle \underline{\Delta\gamma}_2 \rangle = \underline{S}_2 \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle \quad (2-6)$$

$$\langle \underline{\Delta\gamma}_3 \rangle = \underline{S}_3 \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle \quad (2-7)$$

其中  $\underline{S}_1$ 、 $\underline{S}_2$  和  $\underline{S}_3$  为无限大体中球形夹杂的 Eshelby 张量。由于扰动应力场的平均值必须为 0，则有：

$$\int_D \sigma_{ij} dx = 0 \quad (2-8)$$

通过数学变换可改写式 (2-8) 为

$$f_1 \langle \underline{\sigma}^{\Omega_1} \rangle + f_2 \langle \underline{\sigma}^{\Omega_2} \rangle + f_3 \langle \underline{\sigma}^{\Omega_3} \rangle + (1 - f_1 - f_2 - f_3) \langle \underline{\sigma}^M \rangle = 0 \quad (2-9)$$

其中  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  为细骨料、粗骨料和纤维的体积率， $f_m$  为基体体积含量。

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_m = 1 \quad (2-10)$$

将式 (2-5)~式 (2-7) 分别代入式 (2-2)~式 (2-4)，有：

$$\underline{\sigma}^{\Omega_1} = \langle \underline{\sigma}^M \rangle + \underline{C}(\underline{S}_1 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle \quad (2-11)$$

$$\underline{\sigma}^{\Omega_2} = \langle \underline{\sigma}^M \rangle + \underline{C}(\underline{S}_2 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle \quad (2-12)$$

$$\underline{\sigma}^{\Omega_3} = \langle \underline{\sigma}^M \rangle + \underline{C}(\underline{S}_3 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle \quad (2-13)$$

其中  $\underline{I}$  为单位张量。可得：

$$\underline{\sigma}^M = -[f_1 \underline{C}(\underline{S}_1 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle + f_2 \underline{C}(\underline{S}_2 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle + f_3 \underline{C}(\underline{S}_3 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle] \quad (2-14)$$

$$\underline{\sigma}^{\Omega_1} = (1 - f_1) \underline{C}(\underline{S}_1 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle - f_2 \underline{C}(\underline{S}_2 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle - f_3 \underline{C}(\underline{S}_3 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle \quad (2-15)$$

$$\underline{\sigma}^{\Omega_2} = (1 - f_2) \underline{C}(\underline{S}_2 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle - f_1 \underline{C}(\underline{S}_1 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle - f_3 \underline{C}(\underline{S}_3 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle \quad (2-16)$$

$$\underline{\sigma}^{\Omega_3} = (1 - f_3) \underline{C}(\underline{S}_3 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_3^* \rangle - f_1 \underline{C}(\underline{S}_1 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_1^* \rangle - f_2 \underline{C}(\underline{S}_2 - \underline{I}) \langle \underline{\epsilon}_2^* \rangle \quad (2-17)$$