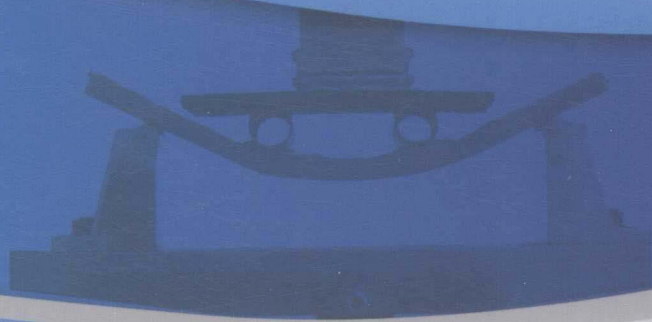




Properties and Applications of
Engineered Cementitious Composites



工程水泥基复合材料的 性能及应用

俞家欢◎著

中国建筑工业出版社

工程水泥基复合材料的性能及应用

俞家欢 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程水泥基复合材料的性能及应用/俞家欢著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 9
ISBN 978-7-112-12219-6

I. ①工… II. ①俞… III. ①水泥混合料: 复合材料-研究 IV. ①TQ172. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 125246 号

本书介绍了工程水泥基复合材料的配制及力学性能, 对以聚乙烯醇纤维为主的纤维品种、掺量, 粉煤灰掺合料, 结构初始缺陷等对工程水泥基复合材料的性能影响进行了试验研究, 同时通过大量工程实例, 介绍了该类型材料在裂缝修补中的应用方式及效果。

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, 以及从事结构修复、加固的工程人员使用。

* * *

责任编辑: 郇锁林 万 李

责任设计: 陈 旭

责任校对: 姜小莲 赵 颖

工程水泥基复合材料的性能及应用

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

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9¼ 字数: 226 千字

2010 年 9 月第一版 2010 年 9 月第一次印刷

定价: 25.00 元

ISBN 978-7-112-12219-6

(19492)

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

近几年来，全世界每年混凝土的用量均在 50 亿 m^3 以上，混凝土已成为使用最广泛的建筑材料，也正朝着高强度、高性能和多功能的方向发展。高强度或高性能混凝土也应该是高抗裂的混凝土，但目前高强度混凝土普遍存在收缩变形大、抗裂能力低、脆性大的明显缺点。如何有效地解决混凝土的抗裂问题，已成为工程界十分关注的热点问题。

复合化是各种材料发展的主要途径，混凝土也不例外。新石器时代用泥浆胶结大卵石作为柱基（西安半坡遗址），用草木筋增强黄土与黄土结核（料浆石）泥浆抹墙打地坪；古埃及人用石膏砂浆砌金字塔；古罗马人用火山灰石灰混凝土建造斗兽场与水渠、桥梁；至今仍存有东汉时期的石灰三合土房基与路基；唐、宋以来用桐油、牛马血、糯米汁、羊桃藤汁掺入石灰砂浆中增加密实度，也改善了防水与耐久性。传说古罗马及秦长城已使用牛马血外加剂，可以说是引气外加剂的远祖。近代工程实践中出现的各种增强混凝土，掺加混合材料和多种化学外加剂，都是为了形成复合材料来改善性能，以达到增强、耐久、经济的目的。

自 20 世纪 90 年代初开始，合成纤维在改性混凝土中扮演了越来越重要的角色，特别是聚乙烯醇纤维，在高新技术的生产工艺背景下解决了易老化和不易掺合的工艺难题，所以能够在完全不增加施工难度的前提下取得改善混凝土性能的显著效果，受到工程界越来越多的注意。早期合成纤维混凝土发展的标志性产品特征，可以日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇纤维为例，由于在材料生产技术方面的重要改进，以及特殊表面涂层技术的突破，使其具有很好的抗老化能力，对酸、碱、紫外线等都有极高的耐受力。聚乙烯醇纤维的化学稳定性使其能够在混凝土中长期保持良好的性能，从而有效控制混凝土塑性收缩和沉降引起的裂缝问题，改善混凝土的抗裂、抗渗性能，提高其抗冲击和抗冻能力。在美国、日本等发达国家，聚乙烯醇纤维大量用于地下工程防水，工业与民用建筑的屋面、墙体和楼面，公路及桥梁工程。由于聚乙烯醇纤维在混凝土施工中拌合容易、分布均匀、施工简单、效果显著，已经成为深受国外建筑工程界青睐的高科技建筑材料。

本书介绍了工程水泥基复合材料，特别是聚乙烯醇纤维工程水泥基复合材料的配制及力学性能，以及不同纤维掺量及品种、环保型粉煤灰掺合料、随机分布缺陷等对工程水泥基复合材料的影响，同时还引入了大量的工程实例以说明该复合材料在工程中的应用。成书之立意在于普及，尤其希望能够帮助广大读者解决若干实用问题。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纤维增强水泥基复合材料 (FRCC)	1
1.1.1 FRCC 的定义	1
1.1.2 FRCC 的发展与应用	1
1.2 高性能纤维增强水泥基复合材料 (HPFRCC)	1
1.2.1 HPFRCC 的定义	1
1.2.2 HPFRCC 的发展历史和工程应用	2
1.3 工程水泥基复合材料 (ECC)	2
1.3.1 ECC 概述	2
1.3.2 ECC 的性能	4
第 2 章 ECC 的纤维增强增韧理论	10
2.1 ECC 增韧理论的基本概念	10
2.1.1 应变软化与应变硬化	10
2.1.2 多缝开裂、局部开裂与饱和状态下多缝开裂的间距	10
2.1.3 脆性、半脆性与韧性	12
2.2 ECC 增强增韧理论	12
2.2.1 纤维间距理论	12
2.2.2 纤维桥接法则	12
2.2.3 ECC 的复合力学理论	13
2.2.4 假应变硬化和多缝开裂的判据	14
2.2.5 变位约束细观模型	15
第 3 章 聚乙烯醇纤维工程水泥基复合材料 (PVA-ECC) 的配制	19
3.1 试验原材料	19
3.1.1 纤维	19
3.1.2 基体	23
3.2 试验设备	27
3.3 配合比设计	28
3.3.1 基本要求	28
3.3.2 技术途径和措施	29
3.3.3 配合比设计	30
3.4 配制方法	31
第 4 章 PVA-ECC 的工作性	33
4.1 试验方法	33
4.2 不同纤维体积率及品种对流动性的影响	33

4.3	不同纤维体积掺量及长度对流动性的影响	35
4.4	不同硅砂含量及粒径对流动性的影响	36
4.5	不同增稠剂与减水剂掺量对流动性的影响	37
4.6	不同粉煤灰掺量对流动性的影响	38
4.7	不同品种和掺量的减水剂对流动度经时损失的影响	39
第5章	PVA-ECC 的抗压性能	41
5.1	试件设计	41
5.2	试件制作	41
5.3	试验方法与步骤	42
5.4	抗压破坏形态	43
5.5	28d 龄期下不同养护条件对抗压强度的影响	44
5.6	28d 龄期不同纤维掺量对抗压强度的影响	45
5.7	不同增稠剂与减水剂掺量对抗压强度的影响	47
第6章	PVA-ECC 的轴拉性能	49
6.1	引言	49
6.2	试件设计和加载装置	49
6.2.1	试件设计	49
6.2.2	加载装置	51
6.3	试验结果分析	52
6.4	直接拉伸分析	56
6.4.1	直接拉伸曲线模型	57
6.4.2	PVA-ECC 的多缝开裂分析	58
6.5	小结	59
第7章	不同纤维掺量及品种对 ECC 弯曲性能的影响	61
7.1	ECC 的弯曲性能	61
7.2	薄板弯曲荷载-挠度曲线模型	61
7.3	试件设计与试验装置	62
7.4	试验结果的评价方法与计算	63
7.4.1	试验结果的评价方法	63
7.4.2	试验结果计算与分析	64
7.5	薄板弯曲韧性评价	67
7.5.1	弯曲韧性评价方法	67
7.5.2	薄板四点弯曲韧性的评价	67
第8章	环保型大掺量粉煤灰工程水泥基复合材料 (HVFA-ECC) 的研制	69
8.1	引言	69
8.2	粉煤灰对 ECC 性能改善的分析	70
8.2.1	我国粉煤灰的评价标准及评价指标	70
8.2.2	粉煤灰对 ECC 性能的影响	71
8.3	HVFA-ECC 的流动性试验研究	74

8.3.1	材料组成	75
8.3.2	试验原理	76
8.3.3	试验方法	77
8.3.4	流动性试验的结果分析	78
8.4	HVFA-ECC 的弯曲性能	79
8.4.1	试验材料	79
8.4.2	材料设计方法	79
8.4.3	试件制作	81
8.4.4	加载方案及设备	82
8.4.5	粉煤灰对弯曲性能的影响	83
8.5	HVFA-ECC 的技术经济分析	87
8.5.1	粉煤灰现状	87
8.5.2	粉煤灰对环境的影响	89
8.5.3	HVFA-ECC 的环保经济效应	90
8.6	小结	92
第 9 章	随机分布缺陷对 PVA-ECC 多缝开裂破坏影响的试验与随机细观统计力学的研究	93
9.1	引言	93
9.2	多缝开裂破坏的细观力学准则	94
9.3	多缝开裂破坏试验过程及结果	95
9.4	多缝开裂破坏的随机分布缺陷细观统计力学模型	97
9.4.1	随机分布初始缺陷的概率统计特征	97
9.4.2	多缝开裂破坏的细观力学模型	98
9.4.3	多缝开裂破坏数值计算模拟结果	99
9.5	小结	100
第 10 章	ECC 叠层修补理论及技术分析	101
10.1	引言	101
10.2	ECC 修补试验的理论分析	103
10.2.1	界面影响	103
10.2.2	捕获机理	107
10.3	ECC 修补试验	109
10.3.1	试件尺寸与模板制作	109
10.3.2	混凝土的制作	110
10.3.3	表面处理	111
10.3.4	ECC 的浇筑与养护	113
10.3.5	加载试验	115
10.4	试验结果及分析	115
10.4.1	试验结果	115
10.4.2	试验结果分析	117

10.4.3	捕获机理的分析	118
10.5	修补技术与经济分析	121
10.5.1	现有的混凝土修补技术	121
10.5.2	ECC 修补技术经济分析	122
第 11 章	ECC 在工程中的应用	123
11.1	引言	123
11.2	ECC 在建筑结构中的应用	124
11.2.1	ECC 性能	124
11.2.2	ECC 作为建筑物连梁	126
11.2.3	PVA-ECC 作为剪力墙	127
11.3	ECC 在桥梁结构及桥面中的应用	128
11.3.1	PVA-ECC 作为桥梁连接板	128
11.3.2	桥梁面板修补	128
11.3.3	连接、修补、加固	129
11.3.4	应用于钢-ECC 混合结构	131
11.4	ECC 在其他工程中的应用	131
11.4.1	PVA-ECC 作为飞机跑道、停机坪的应用	131
11.4.2	喷射 ECC 用于建筑物的修补和翻新工程	132
11.4.3	灌溉渠道的表面修补	133
参考文献		134

第 1 章 绪 论

1.1 纤维增强水泥基复合材料 (FRCC)

1.1.1 FRCC 的定义

将两种或两种以上的不同材料按一定方式结合在一起，除了保留原组成材料各自的特性外，还将产生一种性能显著优于任何一种组成材料的新材料，此新材料即称为“复合材料”。复合材料一般包含两相：一为连续相，称为“基体”；一为分散相，可以是胶状体、颗粒状或纤维状。我们常用水泥净浆、砂浆或混凝土作基体，统称为“水泥基体”，当使用纤维作增强材时，所组成的复合材料统称为“纤维增强水泥基复合材料”（Fiber Reinforced Cementitious Composite，缩写为 FRCC）。

美国混凝土协会（ACI）认为：FRCC 系含有细骨料或粗、细骨料的水硬性水泥与不连续的分散纤维组成的复合材料，连续的网片、织物与长棒不属于分散纤维类的增强材。国内一般定义为：FRCC 是以水泥净浆、砂浆或混凝土作基体，以不连续的短纤维或连续的长纤维作增强材组合成的复合材料。因此，国内将这种复合材料分成水泥净浆或砂浆作为基体的纤维增强水泥以及混凝土作为基体的纤维增强混凝土。

1.1.2 FRCC 的发展与应用

FRCC 早在 19 世纪末就已经开始使用，早期使用天然纤维作为某些无机胶结材料的增强材。20 世纪中期，FRCC 的开发有了较大进展，尤其是丹麦 Krenchel 的论文《纤维增强材》^[1]（Fibre Reinforcement）中首次应用复合材料理论探讨了纤维增强无机胶凝材料的机理。由于石棉的有害性，各国相继限制了石棉水泥制品的生产和使用，以致大量的非石棉纤维水泥制品涌现，如木浆纤维增强水泥、抗碱玻璃纤维增强水泥以及合成纤维水泥制品，还有近些年研制的碳纤维增强水泥、芳纶纤维增强水泥等，这些品种已经大量生产使用。

合成纤维增强混凝土（Synthetic Fiber Reinforced Concrete，缩写为 SNFRC）经大量试验证明：在不高的纤维体积掺量下（0.1%~0.3%），其能起到明显的阻裂与增韧效应，目前已经广泛应用于实际工程。

1.2 高性能纤维增强水泥基复合材料 (HPFRCC)

1.2.1 HPFRCC 的定义

早在我国古代就有将稻草掺入石灰中用于房屋建设的记载，稻草的作用类似于现代的

纤维。普通混凝土抗拉强度低，且随着其抗压强度的增大，脆性也明显增大，往往呈现出无征兆的脆性破坏。将纤维掺入到混凝土中能够明显提高混凝土的抗拉强度，阻碍混凝土内部微裂缝的产生和发展，而且随机分布的纤维有利于增强混凝土的韧性。

1980年 Naaman 首次提出高性能纤维增强水泥基复合材料（High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite，缩写为 HPFRCC）的概念。一般是指在单轴张拉过程中出现肉眼可见的假应变硬化特性的复合材料，材料有着高韧性和高能量吸收能力。之所以在“纤维增强水泥基复合材料”一词前面加上“高性能”，是因为这种复合材料在张拉过程中表现出假应变硬化现象，并伴随有多条裂缝的出现，这些都是与传统的 FRCC 所不同的^[2]。而韧性纤维增强水泥基复合材料（Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite，缩写为 DFRCC），则指在张拉过程中并没有出现假应变硬化特性，但在弯曲过程中出现肉眼可见的假应变硬化特性并有多条裂缝出现的复合材料^[3]。对于 DFRCC 来说，纤维的作用在开裂之后才比较明显。纤维并没有很大程度上影响基体的抗拉强度，只有在基体开裂之后，纤维通过桥联裂缝来增加韧性。虽然这种复合材料能消耗更多的应变能，但是这种类型的材料仍然显示了类似的应变硬化特性。

1.2.2 HPFRCC 的发展历史和工程应用

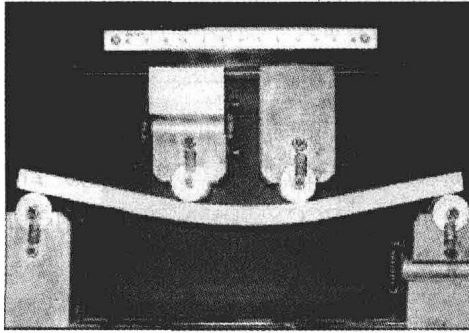
1989年美国国家科学基金会成立“高级水泥基材料科技中心”（ACBM）^[4]，该中心及其他一些研究机构通过大量的试验来研究如何改善水泥基材料的性能。但是，制得的水泥基复合材料的延性与韧性仍然较低，拉（弯）压强度比值的提高幅度较小甚至无提高，有些还呈现较大的脆性。为了弥补高强或超高强水泥基复合材料的上述弱点，最有效的办法是在其中掺加均匀分布的、密集的、长径比较大的高弹性模量的纤维。为了充分发挥纤维对水泥基体的增强、增韧作用，需要在基体发生初裂后，使复合材料出现多缝开裂，并继而呈现假应变硬化，纤维由基体中拔出而导致复合材料的最终破坏。由此开发了多种 HPFRCC，此种复合材料不仅有极高的强度，而且还具有高延性与高韧性。1991年在德国的美因兹（Mainz）举办了第一届国际 HPFRCC 专题研讨会^[5]。会议进一步明确了“高性能”的定义，即不能单纯理解为高强度与高延性，还应包括其他诸多性能，如拌合物的工作性、可成型性和硬化体的刚度、耐久性、抗渗性、抗冻融性、外观质量与稳定性等。

1.3 工程水泥基复合材料（ECC）

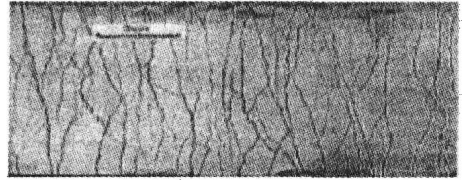
1.3.1 ECC 概述

ECC（Engineered Cementitious Composites）是工程水泥基复合材料的缩写，该材料始于1992年美国密歇根大学（Michigan University）高级土木工程材料研究试验室（Advanced Civil Engineering-Materials Research Laboratory，缩写为 ACE-MRL）。ECC 通常是水泥或者水泥加填料，再掺加小粒径细骨料作为基体，用纤维作增强材料。ECC 的特点是具有超高韧性、高抗拉强度、高抗断裂能力，其拉应变值大于3%，且饱和状态下多缝开裂的裂缝间距小于3mm^[6]。基于 ECC 所具有的应变硬化特性，可实现稳态开裂，这正是 ECC 独特韧性的来源，图 1-1 的弯曲试验充分体现了 ECC 多缝开裂和超高韧性的特

点^[7]。与金属材料不同，ECC 的应变硬化是一个损伤累积的过程，因此也被称为假应变硬化 (Pseudo Strain Hardening)^[8]。应变硬化使 ECC 具有超高的韧性和断裂能，单轴拉伸试验中，ECC 从受力开裂至极限破坏可产生多条细密裂缝，并且饱和状态下多缝开裂的裂缝宽度可控制在 100 μm 以内，最大应变大于 3%^[9]，为普通混凝土的 100~300 倍、钢筋的 5~10 倍，断裂能^[10]高达 24kJ/m²。



(a)



(b)

图 1-1 ECC 弯曲试验及多缝开裂示意图

ECC 的性能和研究方法与 FRCC 及 HP-FRCC 有较大差别。从表 1-1 可以看出，相对于 FRCC 和 HPFRCC，ECC 在复合材料设计方法、纤维特性及掺量、基体特点、界面特点、张拉特性、拉伸应变、裂缝宽度、施工等众多方面都显示出了自身的优越性^[11]。以断裂力学和细观力学为指导，有意识地调整纤维、基体和纤维/基体界面，使得 ECC 材料在硬化后产生假应变硬化效应 (ECC 假应变硬化的拉伸性能示意图 1-2，为三线性模型，另有双线性模型^[12])，这与 FRCC 和 HPFRCC 仅仅通过调整纤维掺量来实现高性能的方法有着显著的区别。

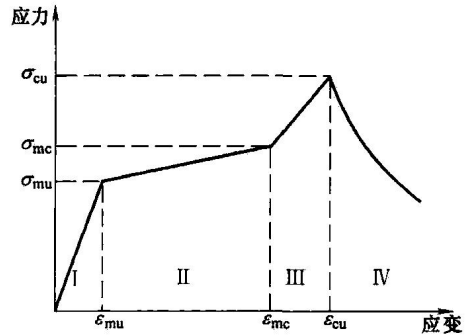


图 1-2 ECC 假应变硬化的拉伸性能示意图

FRCC, HPFRCC 和 ECC 之间的比较

表 1-1

	FRCC	HPFRCC	ECC
复合材料设计方法	一般方法	高体积掺量纤维	以细观力学和断裂力学为基础，考虑造价及施工要求，使临界纤维体积率最低
纤维	任何类型纤维，纤维体积率一般低于 2%，钢纤维直径一般为 500 μm	大多采用钢纤维，纤维体积率大于 5%，纤维直径 150 μm 左右	经过处理的合成纤维，纤维体积率低于 2%，纤维直径小于 50 μm
基体	使用粗骨料	使用细骨料	使用细砂，控制基体断裂韧度和初始缺陷尺寸
界面	未经控制	未经控制	纤维需要控制界面化学结合能 G_d ，界面粘结应力 τ_0
抗拉特性	应变软化	应变硬化	应变硬化

续表

	FRCC	HPFRCC	ECC
弯拉应变	<0.1%	<1.5%	>3%,甚至达到8%
裂缝宽度	无约束作用	数百微米,拉应变>1.5%时没有约束作用	应变硬化时宽度一般小于100 μ m
施工	可实现自密实和挤压密实	可实现挤压密实,纤维掺量高,常要求高频率振动,自密实几乎不可能实现	可实现自密实和挤压密实

纤维增强 ECC 材料最早是用聚乙烯 (Polyethylene, 缩写为 PE) 纤维增强。1997 年 Victor C. Li 和 Kanda 等开始将聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol, 缩写为 PVA) 纤维用于 ECC, 制成了聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料 (PVA-ECC)。PVA 纤维适用于 ECC 的特点是^[13]:

- (1) 抗拉强度和弹性模量高。
- (2) 与硅酸盐水泥有良好的化学相容性。
- (3) 亲水性好, PVA 纤维能均匀地分散在水泥介质中。
- (4) 高强度 PVA 纤维与水泥介质间有良好的界面键合力, 原因在于:

① 该纤维的非环形和不规则截面有助于扩大纤维与水泥介质的成键;

② PVA 纤维的分子结构是 $(-CH_2-CHOH-)_n$, 其一-CHOH 基团可与水泥水化物中的-OH 基团形成牢固的氢键。

PVA 纤维耐酸碱性好, 适用于各种等级的水泥, 能保证 ECC 材料的耐久性、较高的耐气候性且对环境无害。其成本是等体积 PE 纤维的 1/8 且明显低于钢纤维。PVA 纤维的抗拉强度和弹性模量都高于聚丙烯 (Polypropylene, 缩写为 PP) 纤维^[10]。所以, ECC 从开始研究到至今蓬勃发展的过程中, PVA 纤维作为增强材料, 一直都是最佳选择。

1.3.2 ECC 的性能

1. 安全性

为满足抗震的需要, ECC 被推广使用。Billington^[14]指出, 使用 ECC 的结构除了具有抗坍塌能力, 还具有高损伤承受能力, 遭受地震破坏后的残余裂缝宽度很小, 这样能大大减少地震后的修补费用。

关于配筋 ECC 的耐损伤行为已有大量的试验数据。在循环荷载作用下所测试的结构构件包括梁、柱、梁柱连接构件、填充墙、框架、桥墩、连梁、阻尼构件等。这些关于 ECC 及其他衍生材料的研究都证实了 ECC 具有很好的抗震性及最少的震后修补费用。值得注意的是, 配筋 ECC 还表现出了剪应力下的高延性和高能量吸收能力, 并在大侧向位移下有稳定的滞回环及结构整体性。图 1-3 清晰地显示了循环加载下 ECC 构件的高损伤承受力^[15], 试验结果还表明: 由于 ECC 优良的剪切延性, 箍筋的数量可以减少甚至不配箍筋。

配筋 ECC 的最大特性是它的拉伸延性, 这使得 ECC 与钢筋之间有协调一致的变形, 即使钢筋达到塑性屈服时也是如此^[16]。由于 ECC 在剪切应力条件下承受斜拉力而呈多缝

开裂，因此 ECC 的拉伸延性好即意味着其剪切延性也好^[17]。ECC 在冲击荷载下的抗碎裂特性已经通过试验得到证实。Maalej 等^[18]通过试验证实：经高速射弹冲击后的 ECC 板损伤小、整体性好、呈多缝分布开裂且耗能性好。

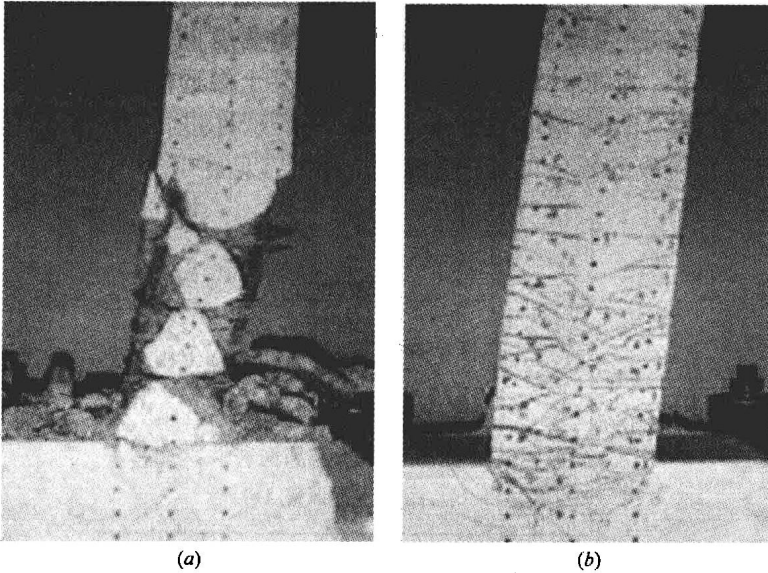


图 1-3 循环加载下构件的破坏形式
(a) 配筋普通混凝土构件；(b) 配筋 ECC (无箍筋) 构件

2. 耐久性

在环境和机械荷载下，基础设施老化的原因是错综复杂的。对于桥梁和公路，破坏通常是从温度变化、约束条件下的干燥收缩或自收缩引起的开裂开始的^[19]。车辆行驶造成的疲劳荷载，使得开裂更为严重^[20]。开裂的混凝土面层具有传输特性，氯化物或其他侵蚀性介质易于从面层渗透至钢筋表面，继而使钢筋锈蚀，产生膨胀应力，最终导致脆性混凝土保护层剥落。

混凝土的低拉伸应变能力 (0.01%) 使其易于开裂，裂缝宽度需要由钢筋控制，且毫米级宽度的裂缝很常见^[21]。一方面，混凝土裂缝宽度需要由钢筋控制；另一方面，侵蚀性介质会通过裂缝渗透而使钢筋锈蚀，这正是目前基础设施破坏的问题所在。混凝土另一大缺陷是脆性破坏特性，这也是混凝土保护层易于剥落的原因。

试验研究证实：ECC 能够改变上述破坏过程。在限制干燥收缩的条件下，ECC 的裂缝宽度限制在 $30\mu\text{m}$ 左右。特别值得注意的是，ECC 的裂缝宽度与结构的尺寸无关^[22]，而普通混凝土则不同。图 1-4 所示为混凝土和 ECC 无接缝桥面

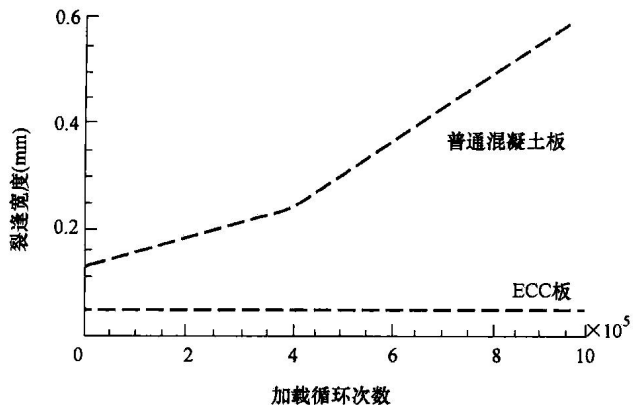


图 1-4 疲劳加载条件下连接板裂缝宽度发展

连接板在疲劳加载情况下的裂缝宽度发展情况^[23]，疲劳荷载似乎不会增加 ECC 连接板裂缝的宽度。经 10^6 次循环后，混凝土连接板裂缝宽度超过 0.6mm，而 ECC 连接板裂缝宽度保持在 $50\mu\text{m}$ 左右。

混凝土保护层的传输性质决定了侵蚀性介质渗透至钢筋所需的时间。传输机制包括渗透、扩散和毛细吸附。开裂混凝土的渗透率是裂缝宽度的三次幂^[24]，裂缝宽度低于 $100\mu\text{m}$ （对于气体渗透，为 $50\mu\text{m}$ ）时，可以认为混凝土渗透性和未开裂混凝土一致^[25]。对预加 1.5% 拉伸应变（裂缝宽度为 $60\mu\text{m}$ ）的 ECC 试件进行渗透性试验，结果证实：ECC 加载至应变硬化阶段的行为与未开裂混凝土相近，见图 1-5^[26]。

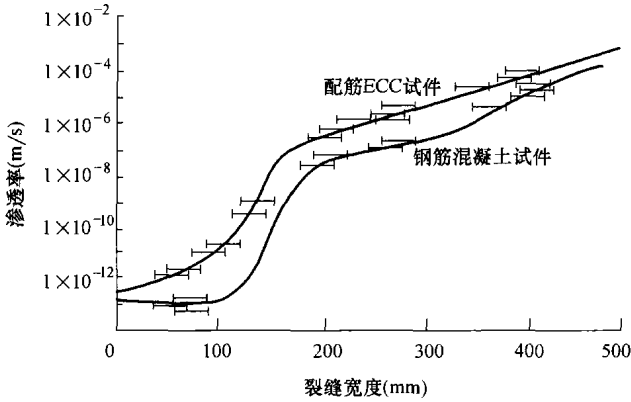


图 1-5 初始应变为 1.5% 的配筋 ECC 和钢筋混凝土试件在单轴拉伸下的渗透率和裂缝宽度的关系^[27]

钢筋混凝土和配筋 ECC 构件中钢筋总的腐蚀率分别为大于 0.008mm/s 、小于 0.0004mm/s ^[28]，见图 1-6。由于裂缝宽度小，因此 ECC 中毛细管传输可能不会令人关注。然而最近的研究^[22]表明：ECC 的毛细吸附可通过憎水涂层表面来控制。

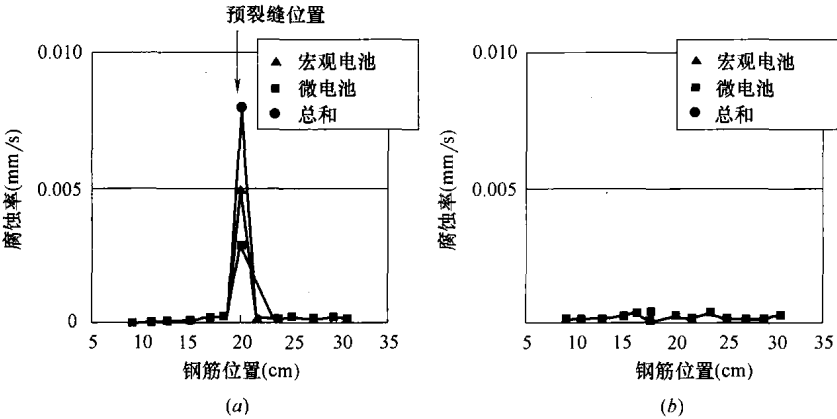


图 1-6 构件中钢筋沿长度方向的腐蚀率
(a) 钢筋混凝土构件；(b) 配筋 ECC 构件

ECC 的抗剥落性测试是通过将锥形钢棒压入 ECC 板来模拟钢筋锈蚀产生膨胀应力的过程^[29]。测试结果表明：ECC 板通过塑性屈服过程克服膨胀力，并形成放射状的微裂纹，而普通混凝土板在膨胀应力的作用下则碎裂。图 1-7 所示为试验后混凝土板断裂破坏模式

及 ECC 板的损伤模式。ECC 板能承受高达 30kN 的荷载，而混凝土板所承受的荷载仅 7kN。由此可知，当用 ECC 取代普通混凝土时，基础设施的缺陷，包括有限制条件下收缩开裂、疲劳裂纹扩展、介质在混凝土保护层中的传输、侵蚀性介质通过混凝土保护层迅速渗透至钢筋表面、钢筋锈蚀及保护层剥落等问题，均能够得到减缓甚至避免。ECC 因其优异的拉伸延性以及裂缝宽度控制特性使基础设施具有更高的耐久性。

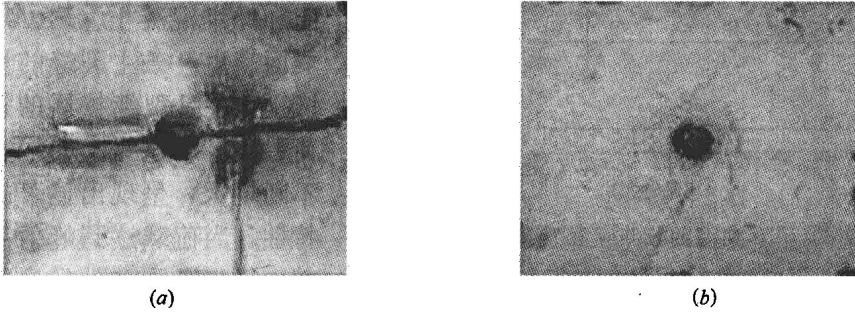


图 1-7 普通混凝土板和 ECC 板的破坏模式^[29]

(a) 普通混凝土板；(b) ECC 板

3. 可持续性

基础设施的可持续性既要考虑到建筑材料的环境友善性，也应考虑基础设施生命周期不同阶段的经济、社会及环境成本。现有的关于环保建材的研究很少考虑全生命周期的成本。即使考虑全生命周期的成本时，也仅从经济角度考虑，只关心业主成本，而不从社会及环境角度考虑至关重要的用户成本和其他外部成本。为实现基础设施的可持续性目标，环保 ECC 的发展需要一个更全面的生命周期框架模型，以综合考虑社会、环境及经济三大要素^[30]。密歇根大学正在构建基于土木工程和材料学、环境经济学、工业生态学、公共健康学以及地质科学等学科交叉的模型框架^[31]。最初版本的综合生命周期评估及成本模型已经在—个钢筋混凝土桥面板接缝设计的项目中得到应用，对两种设计方式进行了评估：一种设计是采用传统的机械伸缩缝；另一种是采用 ECC 无缝连接板。考虑桥梁的服务年限为 60 年，对两个设计系统的生命周期能耗、温室气体排放、建设和修复的费用及社会成本（包括施工导致的交通延误及环境污染成本）进行量化，结果表明：ECC 无缝连接板与有传统伸缩缝的板相比有 37% 的经济成本优势，主要能耗减少 40%，CO₂ 排放量减少 39%。结果还显示了 ECC 无缝连接板设计在使用期对减少全生命周期成本和环境负荷方面的优势。此外，尽管每单位质量的 ECC 成本是普通混凝土的 3 倍，但由于使用 ECC 时，修补频率降低，材料用量减少，因此，其生命周期成本与普通混凝土相比仍比较低。

上述结论定量描述了在基础设施建设中使用 ECC 的优势，这是建立在一个有待证实的假设之上的，即使用 ECC 连接板的桥面服务年限是使用传统伸缩缝的桥面的 2 倍。

4. 拉伸性能

ECC 材料抗拉性能的研究是通过单轴拉伸试验来实现的，ECC 典型的拉伸应力-应变曲线如图 1-8 所示。试件加载出现第一条裂缝后，荷载只有非常小幅度的突降，因为试件

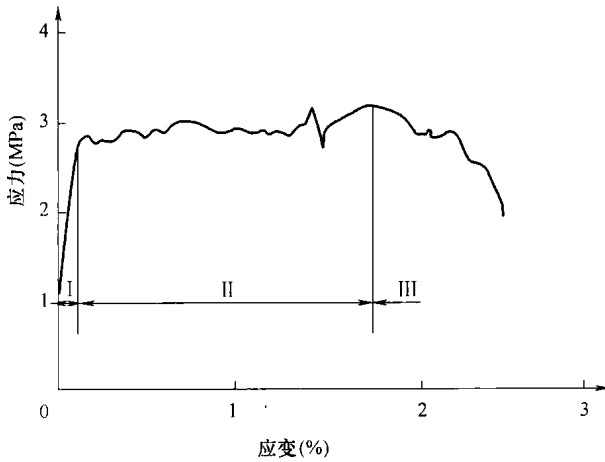


图 1-8 ECC 典型的拉伸应力-应变曲线^[26]

中跨越裂缝的增韧纤维起到的桥联作用很好地传递了基体/界面应力，荷载随后又出现了上升的趋势，直到下一条裂缝的产生。整个加载过程中，试件表面产生多条宽度大致相同的细密裂缝，这与普通素混凝土和纤维混凝土（FRC）只在最薄弱面产生一条主裂缝的情况有很大区别，并且裂缝扩展的过程中，在荷载没有明显提高的情况下应变却不断增大，呈现出显著的应变硬化特性。当荷载达到峰值后，试件在其中的一条裂缝处发生局部破坏直至最终破坏。

ECC 的极限拉应变接近素混凝土或 FRC 的 500 倍，体现了材料独特的超高韧性。

5. 抗压性能

图 1-9 所示为素混凝土、PE-ECC、PVA-ECC 三种材料的受压应力-应变曲线，PE-ECC 和 PVA-ECC 都不使用粗骨料，所以弹性模量均低于素混凝土。PE-ECC 与 PVA-ECC 峰值应力对应的压应变大约为 0.5%，而混凝土仅为 0.2%。从图中可以发现 PVA-ECC 试件受压曲线在经过峰值荷载后，承载力下降的速度明显慢于素混凝土，说明 ECC 具有比素混凝土更高的韧性，其中 PVA-ECC 的韧性又比 PE-ECC 更高一些。

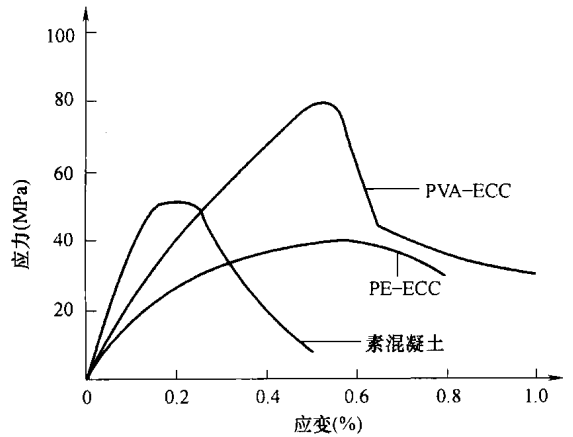


图 1-9 素混凝土、PE-ECC 与 PVA-ECC 的受压应力-应变曲线^[27]

6. 弯曲性能

图 1-10 是纤维掺量相同时素混凝土、FRC、PVA-ECC 同尺寸薄板试件四点弯曲试验的受弯应力-形变曲线^[22]。在试件出现裂缝前，三种材料的应力-形变曲线基本重合，说明纤维在材料开裂前对它的力学性能影响很小。出现裂缝后，素混凝土试件马上发生脆性破坏；FRC 试件虽然还能继续承受荷载，表现出一定的延性，但随应变的增大也迅速破坏；而 PVA-ECC 试件在第一条裂缝出现后，应力继续增长，有明显的应变硬化过程，并伴随着大量新的微细裂缝的继续出现，直至破坏，表现出很高的延性和抵抗弯曲变形的能力。

7. 抗剪性能

Kanda^[32] 采用了“奥诺剪力梁 (Ohno Shear Beam)”，通过改变跨高比和抗剪钢筋的数量，研究了拉应变为 1% 时 PVA-ECC 短跨配筋梁在周期循环作用下的结构承载力和韧性。试验结果表明：

(1) 剪拉破坏时, PVA-ECC 梁的承载力比素混凝土梁提高了 50%, 而极限位移增长超过两倍, 破坏模式具有明显的延性特征; 剪压破坏时, PVA-ECC 梁的承载力也提高了 50%, 但极限位移无明显差别。可见 PVA-ECC 对梁抵抗剪拉破坏的增强作用优于剪压破坏。

(2) PVA-ECC 梁中出现了细密裂缝, 裂缝一直垂直延伸至试件高度的中部附近。

Vasillag Xoxa^[29] 利用平面纯剪试验对 PVA-ECC 板的抗剪性能进行了较为系统的研究。研究表明:

PVA-ECC 板在剪切作用下从未裂到开裂是个渐进的过程, 不会出现刚度的突然下降, 而刚度的突降在普通混凝土中是非常典型的破坏特征; PVA-ECC 板在剪力作用下出现了大量的相互平行且分布密集的裂缝, 即使是在同一条直线上的裂缝也不会贯通, 裂缝间距随配筋率的增加而减小; 在整个试验过程中直至试件破坏, 都没有出现 ECC 剥落现象。

8. 抗疲劳破坏性能

Takashi^[33] 对 PVA-ECC 进行了抗弯疲劳试验, 并根据试件的静态弯曲强度, 将疲劳应力分为 5 个等级, 用 S 表示疲劳应力与疲劳极限的比值。试验结果表明: PVA-ECC 的疲劳应力-寿命曲线呈现出类似于金属的双线性关系, 尤其在高应力水平下其抗疲劳破坏能力较强。试件裂缝的数量随疲劳应力水平的降低而减少, 这是因为在循环加载中, 裂缝大多是在第一次加载中发展形成的, 因此裂缝数量和宽度都取决于疲劳应力水平。PVA-ECC 比 FRC 具有更高的抗疲劳破坏能力, 尤其在高应力水平下, PVA-ECC 所具有的抗变形能力和多缝开裂特性, 对于提高结构的延性和抗破坏能力都有很大的作用。

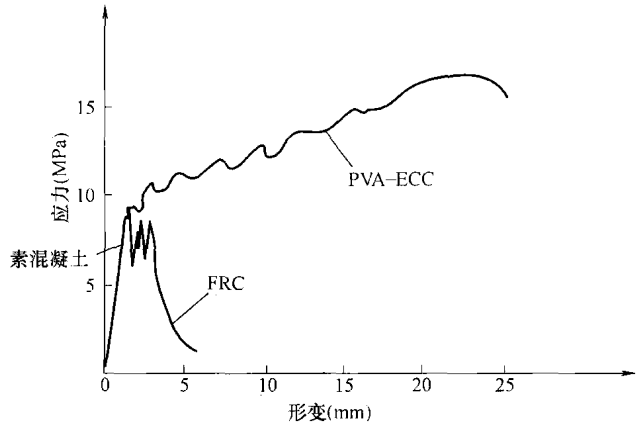


图 1-10 素混凝土、FRC、PVA-ECC 四点弯曲试验的受弯应力-形变曲线