

PVA纤维水泥基复合材料 性能及其抗冻、抗盐腐蚀研究

刘曙光 闫长旺 著



科学出版社

PVA 纤维水泥基复合材料性能 及其抗冻、抗盐腐蚀研究

刘曙光 闫长旺 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容涉及到 PVA 纤维水泥基复合材料性能、抗冻、抗盐腐蚀性等方面,包括单轴受压性能,抗折、抗冲击及拉压比性能,抗渗与早龄期抗裂性能,抗冻性能,抗盐冻性能,氯离子渗透性能,抗硫酸盐侵蚀性能,材料与钢筋锚固性能以及 BP 神经网络研究应用,共 10 章。书中内容采用试验研究、理论分析、微观结构分析、数值模拟等研究方法,深入论述了耐久性方面的机理、规律和使用寿命,对于改善传统混凝土材料与结构耐久性有重要的学术价值。

本书可供从事桥梁、水利、交通、铁路、建筑工程等领域研究的科研人员、工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业的研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

PVA 纤维水泥基复合材料性能及其抗冻、抗盐腐蚀研究/刘曙光, 闫长旺著. —北京: 科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-037284-0

I. ①P… II. ①刘…②闫… III. ①纤维增强水泥-水泥基复合材料-研究 IV. ①TB333

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 072254 号

责任编辑: 任加林 童安齐/责任校对: 柏连海

责任印制: 吕春珉/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 4 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 248 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

长期以来,混凝土材料脆性大、韧性差的缺点影响着混凝土结构或构件的受力性能和使用寿命,一直困扰着土木工程界的科研技术人员。聚乙烯醇纤维(polyvinyl alcohol,简称PVA)水泥基复合材料具有良好的韧性、拉伸变形能力、阻裂能力等优点,在荷载作用下,可呈现出多点开裂的性能,并且可以显著阻止裂缝的扩展、降低裂缝的宽度,提高结构或构件抵抗水分、氯离子、硫酸根离子及其他有害物质侵入的能力,从而提高结构或构件的使用寿命。开展PVA纤维水泥基复合材料的研究工作,对于克服传统混凝土材料的不足、提高结构或构件的使用寿命、降低维护成本,具有重要的工程价值和学术意义。

近几年,刘曙光教授和他的研究小组在国家自然科学基金、内蒙古自然科学基金、内蒙古自治区高等学校科学研究项目、内蒙古工业大学科学研究项目等基金项目的资助下,以PVA纤维水泥基复合材料为研究对象,从抗压、抗折、抗冲击、抗渗、早龄期抗裂、抗冻、抗盐冻、抗氯离子和硫酸根离子侵蚀以及与钢筋的黏结性能等多方面,开展了深入系统的研究工作,取得了一些研究成果,为PVA纤维水泥基复合材料的推广和应用提供了试验背景和理论依据,为提高工程结构耐久性能提供了可借鉴的途径。

该书涉及土木工程、材料工程以及化学与力学等领域,有较高的学术价值和工程应用价值,对进一步从事工程结构受力性能、耐久性研究以及改善实际工程耐久性有重要参考价值。我衷心祝贺科学出版社出版这本专著,并相信本书的出版将对工程结构受力性能和耐久性性能领域的研究与应用起到有力的推动作用。

中国工程院 院士
大连理工大学 教授

赵国藩

2013年1月

前 言

具有良好韧性、拉伸变形能力、阻裂能力等优点的聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, 简称 PVA) 纤维水泥基复合材料, 为克服传统混凝土材料脆性大、韧性差的缺点, 改善混凝土结构受力性能和耐久性能提供了可借鉴的途径, 已经逐渐成为土木工程领域研究的一大热点。

近几年, 作者和研究小组有幸得到国家自然科学基金 (No. 50968011, 51168033)、内蒙古自然科学基金 (No. 2012MS0706, 2009MS0716)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (No. NJZY12058)、内蒙古工业大学科学研究项目 (No. ZS201137) 等项目的资助, 使得作者能够在 PVA 纤维水泥基复合材料的基本性能、抗冻、抗盐腐蚀方面, 比较系统地开展并完成一些初步研究工作, 本书就是上述研究工作的一个阶段性总结。

本书共分为 10 章, 主要内容包括绪论、PVA 纤维水泥基复合材料的单轴受压性能、PVA 纤维水泥基复合材料抗折强度与弯曲冲击性能、抗渗性能与早期抗裂性能、抗冻性能、抗盐冻性能、氯离子渗透性能、抗硫酸盐腐蚀性能, 以及 PVA 纤维水泥基复合材料与钢筋锚固性能、人工神经网络在 PVA 纤维水泥基复合材料研究中的应用。上述内容是在认真学习国内外专家、学者和工程技术人员研究成果的基础上, 由作者及其课题组成员完成的, 其中凝聚着学生们的智慧和辛劳, 按照参与课题研究时间的先后顺序, 他们分别是: 王大辉、姜海军、白建文、闫敏、侯慧芳、赵晓明、尚君、张华、王志伟、郑德路、成芳等。

在课题研究与书稿整理过程中, 还得到内蒙古工业大学张菊副教授、内蒙古公路局王嵘教授级高工、呼和浩特市建设工程质量监督站何存高级工程师、中铁六局集团呼和浩特铁路建设公司郭荣跃高级工程师的鼎力支持, 在此表示感谢。

特别感谢中国工程院院士、大连理工大学赵国藩教授为本书撰写序。

由于作者水平有限, 书中可能有许多不足之处, 恳请专家和读者批评指正, 在此致谢。

作 者

2013 年 1 月 10 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 PVA 纤维水泥基复合材料的发展	1
1.2 PVA 纤维水泥基复合材料的应用	3
1.3 PVA 纤维水泥基复合材料的基本性能及其国内外研究现状	5
1.4 PVA 纤维水泥基复合材料的耐久性能及其国内外研究现状	7
1.5 本书主要研究内容	9
第 2 章 PVA 纤维水泥基复合材料单轴抗压性能	10
2.1 试验概况	10
2.1.1 试验材料	10
2.1.2 试验配合比	10
2.1.3 试件设计	11
2.1.4 试验方法	13
2.2 应力-应变曲线及分析	14
2.2.1 单轴受压过程分析	14
2.2.2 PVA 纤维体积率对试件单轴受压应力-应变曲线的影响	16
2.2.3 钢筋约束对试件单轴受压应力-应变曲线的影响	17
2.2.4 硅粉对试件单轴受压应力-应变曲线的影响	18
2.3 峰值应力与峰值应变	18
2.3.1 PVA 纤维水泥基复合材料棱柱体峰值应力分析	18
2.3.2 PVA 纤维水泥基复合材料棱柱体峰值应变分析	20
2.4 应力-应变曲线理论方程	21
2.4.1 理论方程表达式	21
2.4.2 确定参数	21
2.4.3 理论曲线与试验曲线的比较	22
2.5 单轴受压韧性	23
2.5.1 韧性与韧性指标	23
2.5.2 PVA 纤维对棱柱体试件单轴受压韧性的影响	25
2.5.3 钢筋约束对单轴受压韧性的影响	28

2.5.4	硅粉对棱柱体试件单轴受压韧性的影响	28
第3章	PVA 纤维水泥基复合材料抗折、抗冲击及拉压比性能	30
3.1	试验概况	30
3.1.1	试件制作	30
3.1.2	抗折强度试验方法	31
3.1.3	弯曲冲击试验方法	32
3.1.4	拉压比试验方法	33
3.2	PVA 纤维水泥基复合材料抗折强度	34
3.2.1	PVA 纤维体积率对抗折强度的影响	34
3.2.2	粉煤灰和硅粉对抗折强度的影响	34
3.3	PVA 纤维水泥基复合材料抗冲击性能	35
3.3.1	冲击破坏形态	35
3.3.2	冲击试验结果	35
3.3.3	初裂落锤数与破坏落锤数	36
3.3.4	冲击延性	37
3.3.5	冲击耗能	37
3.4	PVA 纤维水泥基复合材料拉压比性能	38
3.4.1	试验结果	38
3.4.2	立方体抗压强度	39
3.4.3	劈裂抗拉强度	41
3.4.4	拉压比性能	42
第4章	PVA 纤维水泥基复合材料抗渗性能与早龄期抗裂性能	43
4.1	试验概况	43
4.1.1	试件制作	43
4.1.2	抗渗性能试验方法	44
4.1.3	早龄期抗裂性能试验方法	45
4.2	PVA 纤维水泥基复合材料抗渗性能	46
4.2.1	渗水深度试验结果	46
4.2.2	PVA 纤维体积率对渗水深度的影响	46
4.2.3	粉煤灰、硅粉对渗水深度的影响	47
4.2.4	PVA 纤维水泥基复合材料水压渗透系数	47
4.3	PVA 纤维水泥基复合材料早龄期抗裂性能	49
4.3.1	早龄期抗裂性能试验结果	49
4.3.2	PVA 纤维体积率对早龄期抗裂性能的影响	50
4.3.3	粉煤灰掺量对早龄期抗裂性能的影响	50

4.3.4 PVA 纤维水泥基复合材料早龄期开裂机理	50
第 5 章 PVA 纤维水泥基复合材料抗冻性能	52
5.1 试验概况	52
5.1.1 试件制作	52
5.1.2 试验方法	53
5.2 冻融试验结果与分析	54
5.2.1 冻融试验结果	54
5.2.2 冻融循环后试件表观形貌分析	55
5.2.3 PVA 纤维体积率对抗冻性能的影响	55
5.2.4 粉煤灰、硅粉对抗冻性能的影响	57
5.3 冻融环境下 PVA 纤维水泥基复合材料力学性能研究	59
5.3.1 PVA 纤维水泥基复合材料棱柱体抗压强度	59
5.3.2 PVA 纤维水泥基复合材料棱柱体轴压变形性能	60
5.3.3 PVA 纤维水泥基复合材料单轴应力-应变曲线	63
5.4 冻融环境下 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构分析	65
5.4.1 试验仪器与试验内容	65
5.4.2 观察结果分析	65
5.5 基于 GM(1,1) 模型的 PVA 纤维水泥基复合材料抗冻性寿命 预测	67
5.5.1 GM(1,1) 模型的建立	67
5.5.2 GM(1,1) 模型精度检验	68
5.5.3 PVA 纤维水泥基复合材料抗冻寿命预测与分析	71
第 6 章 PVA 纤维水泥基复合材料抗盐冻性能	74
6.1 试验概况	74
6.1.1 试件制作	74
6.1.2 盐冻与抗折强度试验方法	74
6.2 PVA 纤维水泥基复合材料抗盐冻性能	75
6.2.1 盐冻试验结果	75
6.2.2 盐冻循环前后试件表观形貌分析	76
6.2.3 PVA 纤维体积率对抗盐冻性能的影响	77
6.2.4 粉煤灰、硅粉对抗盐冻性能的影响	79
6.3 盐冻环境下 PVA 纤维水泥基复合材料抗折强度	80
6.3.1 试验现象分析	80
6.3.2 抗折强度分析	81
6.4 盐冻环境下 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构分析	83

6.4.1	试验仪器与试验内容	83
6.4.2	观测结果分析	83
6.5	PVA 纤维水泥基复合材料盐冻损伤与寿命预测	84
6.5.1	PVA 纤维水泥基复合材料盐冻损伤破坏机理	84
6.5.2	PVA 纤维水泥基复合材料盐冻损伤模型与寿命预测	85
6.6	氯盐环境对 PVA 纤维水泥基复合材料抗冻性能的影响	86
6.6.1	氯盐环境对外观形貌的影响	87
6.6.2	氯盐环境对质量损失率的影响	87
6.6.3	氯盐环境对相对动弹性模量的影响	88
6.6.4	氯盐环境对耐久性指数的影响	89
第 7 章	PVA 纤维水泥基复合材料氯离子渗透性能	91
7.1	试验概况	91
7.1.1	试件设计	91
7.1.2	试验方法	92
7.2	氯离子渗透机理及其分析	95
7.2.1	PVA 纤维对氯离子渗透性能的影响	95
7.2.2	粉煤灰对氯离子渗透性能的影响	97
7.2.3	浸泡方式对氯离子渗透性能的影响	100
7.3	氯离子结合能力	103
7.3.1	氯离子结合理论	103
7.3.2	氯离子结合规律及其分析	104
7.4	氯离子浸泡作用后 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构分析	109
7.4.1	试验仪器与试验内容	109
7.4.2	扫描电镜观测分析	109
7.4.3	能谱分析	112
7.5	基于 GM(1,1) 模型的 PVA 纤维水泥基复合材料中氯离子浓度分析	115
7.5.1	GM(1,1) 模型的建立	115
7.5.2	GM(1,1) 模型的精度分析	116
7.5.3	PVA 纤维水泥基复合材料氯离子浓度分析	118
第 8 章	PVA 纤维水泥基复合材料抗硫酸盐侵蚀性能	119
8.1	试验概况	119
8.1.1	试件设计	119
8.1.2	试验方法	119
8.1.3	性能评价指标	120

8.2 全浸泡作用下 PVA 纤维水泥基复合材料抗硫酸盐侵蚀性能	121
8.2.1 表观形貌分析	122
8.2.2 抗压强度试验结果	124
8.2.3 剩余抗压强度比率	127
8.2.4 抗压抗蚀系数	128
8.2.5 质量变化率	129
8.2.6 体积变化率	132
8.3 干湿循环作用下 PVA 纤维水泥基复合材料抗硫酸盐侵蚀性能	134
8.3.1 表观形貌分析	134
8.3.2 抗压强度试验结果	135
8.3.3 剩余抗压强度比率	137
8.3.4 抗压抗蚀系数	139
8.3.5 质量变化率	140
8.3.6 体积变化率	142
8.4 硫酸盐侵蚀作用下 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构分析	144
8.4.1 试验仪器与试验内容	144
8.4.2 硫酸盐溶液全浸泡作用下 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构	144
8.4.3 硫酸盐溶液干湿循环作用下 PVA 纤维水泥基复合材料微观结构	148
第 9 章 PVA 纤维水泥基复合材料与钢筋锚固性能	152
9.1 试验概况	152
9.1.1 试件设计	152
9.1.2 试验方法	155
9.2 黏结性能及其影响因素分析	157
9.2.1 试验结果与破坏形态	157
9.2.2 PVA 纤维体积率对黏结性能的影响	161
9.2.3 相对保护层厚度对黏结性能的影响	162
9.2.4 锚固长度对黏结性能的影响	162
9.2.5 钢筋直径对黏结性能的影响	163
9.3 黏结-滑移本构关系	163
9.3.1 加载过程与试验现象分析	163
9.3.2 钢筋应力、黏结应力沿锚固长度的分布	164
9.3.3 连续本构模型	167
9.4 锚固长度及其可靠度分析	169
9.4.1 临界锚固长度	169
9.4.2 锚固极限状态方程与目标可靠指标	170

9.4.3	锚固可靠度分析	172
9.4.4	锚固长度建议设计计算公式	174
第 10 章	BP 神经网络在 PVA 纤维水泥基复合材料研究中的应用	175
10.1	人工神经网络概述	175
10.1.1	人工神经网络与 MATLAB 神经网络工具箱	175
10.1.2	BP 神经网络	177
10.2	基于 BP 神经网络预测 PVA 纤维水泥基复合材料抗冻性能	179
10.2.1	预测抗冻性能的 BP 神经网络模型	179
10.2.2	相对动弹性模量训练样本	180
10.2.3	确定 BP 神经网络结构	182
10.2.4	冻融环境下 PVA 纤维水泥基复合材料相对动弹性模量的预测与 分析	184
10.3	基于 BP 神经网络预测 PVA 纤维水泥基复合材料抗盐冻性能	186
10.3.1	相对动弹性模量训练与预测样本	186
10.3.2	确定 BP 神经网络模型	189
10.3.3	盐冻环境下 PVA 纤维水泥基复合材料相对动弹性模量的预测与 分析	190
主要参考文献		193

第 1 章 绪 论

1.1 PVA 纤维水泥基复合材料的发展

大量的混凝土材料与结构的试验研究和工程实践表明：结构表层的混凝土材料的开裂几乎不可避免。为减少甚至消除混凝土材料的早期收缩裂缝、减小荷载导致的裂缝、将混凝土裂缝控制在有害程度允许的范围内，掺有纤维的混凝土材料得到了广泛应用，如聚丙烯纤维混凝土、钢纤维混凝土等应用都取得了良好的效果。但是，这些掺有纤维的混凝土在荷载作用下仍然无法有效控制裂缝的宽度和持续开展，在直接拉伸荷载作用下仍显现出应变软化特性。

1992 年，美国 Michigan 大学先进土木工程材料研究工作试验室（Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory，简称 ACE-MRL）研究了纤维增强水泥基复合材料（Engineering Cementitious Composites，简称 ECC），以水泥或者以水泥加填料，或在上面的基础上再掺加小粒径细骨料作为基体，用纤维做增强材料。纤维增强水泥基复合材料的特点是具有超高韧性，高抗拉应变能力，高抗裂能力，拉应变值大于 3%，并且，多点开裂裂缝间距小于 3mm。它所具有的应变-强化特性是实现稳定开裂的结果，这正是 ECC 与混凝土材料或纤维混凝土材料的主要不同之处，图 1.1 是 ACE-MRL 给出的 ECC 四点弯曲试验及多缝开裂示意图。具有良好韧性的 ECC 纤维体积率在 2%~3% 范围内，可以有效控制：①塑性收缩开裂；②干缩裂缝；③自生裂缝；④疲劳开裂等。

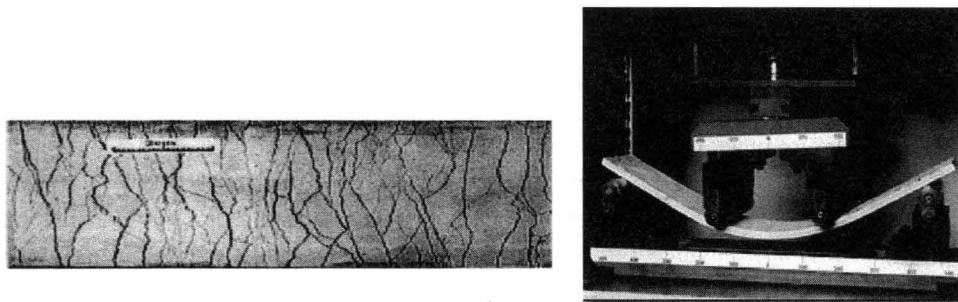


图 1.1 ECC 抗弯试验及多缝开裂示意图

当纤维体积率为 2% 时，钢纤维混凝土峰值应力处对应的拉应变不到 0.04%（400 个微应变）。而 Naaman 和 Reinhard 在 2005 年对 SIFCON、SIMCON 和

ECC 三种材料直接拉伸试验曲线进行了比较,发现钢纤维体积率达到 12% 时, SIFCON 和 SIMCON 的抗拉强度分别是 ECC 的 3 倍和 6 倍,但是,峰值应力对应的拉应变仅 1% (10 000 个微应变),仅是 ECC 的 1/5~1/6, ECC 显示出极强的抗拉韧性。

纤维增强水泥基复合材料是在微观力学的基础上设计得到的。纤维的参数中,弹性模量、长径比、界面摩擦黏结强度对其性能的影响最大。若想获得理想性能,要求纤维的弹性模量要远远高于基体的弹性模量,理想的纤维特性应满足下列条件:直径=30~50 μm ,弹性模量>30GPa,抗拉强度>1000MPa,抗拉应变>3%,密度<2g/cm³,纤维的体积掺量<2%,具有良好的抗腐蚀性能,在水泥基复合材料中具有化学稳定性。满足这一条件的纤维有芳纶 (kev-lart) 纤维、高弹模聚乙烯 (polyethylene, 简称 PE) 纤维、纤维素 (cellulose)、聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, 简称 PVA) 纤维等。

ACE-MRL 掺入 2% 体积率聚乙烯纤维水泥基复合材料可达到 6%~8% 的应变能力,如此大的延性使得它可以用于抗震结构和重要结构的关键节点。但是,聚乙烯的价格较贵,限制了它的实际工程应用,而其他的低价纤维,诸如尼龙、低密度聚乙烯纤维、聚丙烯纤维等,抗拉强度和弹性模量太低。随着科技的进步,高强度、高弹性模量聚乙烯醇 (PVA) 纤维成为比较理想的替代品。

PVA 纤维也称维纶纤维,是以聚乙烯醇为主要原料,运用新型纺丝工业开发制成的高强度、高弹模、水溶性纤维。日本应用高新纺丝技术成功开发的 PVA 纤维,强度达到 21.1cn/dtex,2000 年总产达 2.5 万 t;而 K-II 型高强高弹模 PVA 纤维强度可以达到 22cn/dtex,与以前的水泥增强材料,在性质方面不同,K-II 型 PVA 纤维不只增加强度,而且对混凝土还具有很强的黏结性,使得抗震性能和抗冲击性能得到提高,混凝土的断裂和片状剥落现象也难以发生。而且,具有防止水向混凝土内部浸入的性质,可以防止混凝土中性化和钢筋的腐蚀。

ACE-MRL,日本混凝土工程协会 (Japan Concrete Institute, 简称 JCI) 下设的 JCI TC-015FS Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite 委员会,日本土木工程师学会 (Japan Society of Civil Engineering, 简称 JSCE) 下设的 JSCE TC-334 Fiber Reinforced Mortar with Multiple Cracks,以及 JSCE TC-286 Recommendation of HPFRCC,材料与结构研究试验国际联合会 RILEM HFC-TC/SC3,以及生产 PVA 纤维的日本厂家都在研究掺有 PVA 纤维的水泥基复合材料。

1.2 PVA 纤维水泥基复合材料的应用

PVA 纤维水泥基复合材料以其卓越的力学性能和良好的施工工艺为建设现代新型结构、修复或加固已有结构提供了新的材料选择。目前, PVA 纤维水泥基复合材料已经在日本、美国、瑞士、韩国的实际工程中得到应用, 并取得了良好的成效。PVA 纤维水泥基复合材料的应用主要集中在抗震结构、桥梁结构、公路和铁路以及各种混凝土结构修复方面。

1. 在高层抗震结构中的应用

PVA 纤维水泥基复合材料是一种高延性水泥基复合材料, 在拉伸和弯曲荷载作用下产生应变硬化而不是断裂破坏, 这种类似于金属的延性使其非常适用于承受大变形的结构构件。2006 年和 2007 年, 日本东京和横滨两栋高层建筑中采用 PVA 纤维水泥基复合材料连梁, 标志着高性能纤维水泥基复合材料在全世界高层建筑中的应用。这两栋高层建筑分别是东京的 27 层的 Glorio Roppongi 和横滨的 41 层 Nabeaure Tower, 如图 1.2 和图 1.3 所示。在两栋高层建筑中, PVA 纤维水泥基复合材料连梁的作用是在每一层中连接建筑的核心筒剪力墙, 提高建筑物在地震作用下的能量耗散能力。

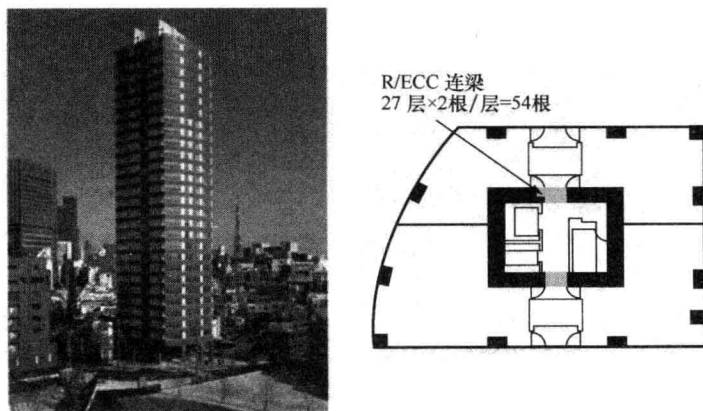


图 1.2 Glorio Roppongi 高层建筑

2. 在桥梁结构中的应用

由于 PVA 纤维水泥基复合材料具有较高的延性、裂缝控制能力和抗拉承载能力, 可提高桥梁结构的承载能力和耐久性, 同时可以减小结构构件的横截面

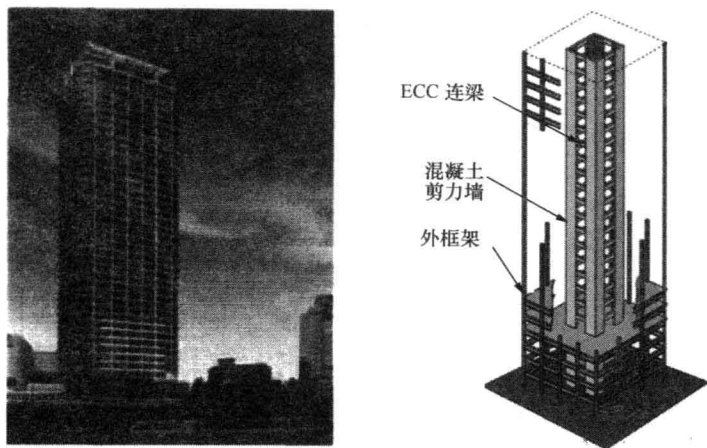


图 1.3 Nabeaure Tower 高层建筑

积。如图 1.4 所示的 2004 年在日本北海道修建的 Mihara 大桥，是一座单索斜拉桥，桥长 972m，主桥跨度 340m，位居世界第八。该桥在施工过程中采用约 40mm 厚的 PVA 纤维水泥基复合材料取代了钢桥面板上的沥青混凝土罩面层，可提高桥梁的承载能力和刚度，同时降低钢桥面板上产生的应力，改善桥梁的抗疲劳性能，施工过程中采用平板销钉来保证 PVA 纤维水泥基复合材料与钢桥面板之间的黏结性能。每天浇筑量大约 30m^3 ，整个桥梁总共浇筑量大约 800m^3 。

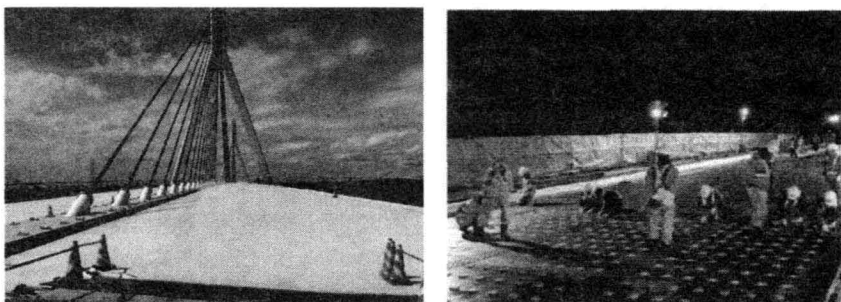


图 1.4 日本北海道 Mihara 大桥

3. 结构修复中的应用

2002 年美国 Michigan 大学与美国 Michigan 州交通局合作，对 Michigan 州东南部的一座双车道钢梁桥的混凝土桥面进行了修复，如图 1.5 所示。该桥分别采用 PVA 纤维水泥基复合材料和混凝土材料进行修复，通过长期观测，发现：修复两天后，PVA 纤维水泥基复合材料没有出现可见裂缝，混凝土由于收

缩等因素产生了约 0.3mm 的裂缝,并且在较短的时间内扩展到 2mm。在经历了四个月的冬季暴露环境后,实地观测发现 PVA 纤维水泥基复合材料中产生了大量的宽度为 0.05mm 左右的微裂缝,混凝土则出现了劣化和表层剥落。30 个月后实地观测,发现 PVA 纤维水泥基复合材料的最大裂缝宽度仍在 0.05mm 左右,而混凝土却出现了严重的劣化。实例表明 PVA 纤维水泥基复合材料是一种耐久性良好的结构材料。

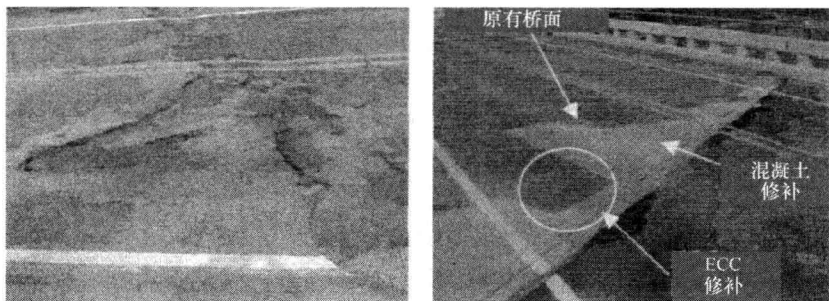


图 1.5 用 ECC 修复路面

此外, PVA 纤维水泥基复合材料在隧道衬砌修复、桥梁连接板修复、挡土墙修复、灌溉水渠修复等方面也有应用,并取得了良好的效果。

1.3 PVA 纤维水泥基复合材料的基本性能 及其国内外研究现状

有关 PVA 纤维水泥基复合材料的研究方面,美国 Michigan 大学 Li 等的研究工作开展得比较早,通过 PVA 纤维水泥基复合材料的单轴拉伸试验,发现:当 PVA 纤维体积率 V_f 为 2.0% 时,极限拉应变超过 4%,极限抗拉强度约为 4.5MPa;采用 0.5% 和 0.8% 油剂处理的 PVA 纤维水泥基复合材料的性能,明显优于 0.3% 油剂处理的 PVA 纤维水泥基复合材料的性能。此后, Li 等研究得出了纤维体积率为 2% 时的 PVA 纤维水泥基复合材料,在拉伸荷载作用下的应力-应变曲线及裂缝发展情况,如图 1.6 所示,可以看出, PVA 纤维水泥基复合材料在初始裂缝产生之后,出现应变硬化并伴随着多缝开裂,反映出 PVA 纤维水泥基复合材料具有良好的裂缝控制能力,即使在极限荷载(应变为 5%)时,裂缝宽度仍保持在 60 μ m 左右。

Fischer 分别对 PVA 纤维水泥基复合材料、PE 纤维水泥基复合材料以及混凝土的抗压性能进行了研究,发现由于缺少粗骨料,水泥基复合材料的弹性模量明显低于混凝土,但是其峰值压应变值较大,约为 0.5%; PVA 纤维水泥基

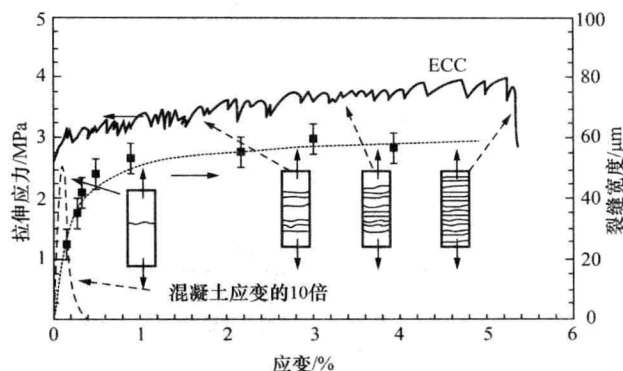


图 1.6 典型的 ECC 拉伸应力-应变曲线和裂缝宽度发展图

复合材料在达到其峰值抗压强度后，压应力缓慢持续下降，抗压破坏模式呈现出显著的韧性特征；而 PE 纤维水泥基复合材料在达到其峰值抗压强度后，压应力先以较快的速率下降至峰值应力的 50% 左右，而后缓慢降低。

薄板四点弯曲试验结果表明，PVA 纤维水泥基复合材料具有良好的弯曲变形能力和优异的裂缝无害化分散能力，如图 1.1 所示。在弯曲荷载作用下，PVA 纤维水泥基复合材料中的 PVA 纤维能够提供足够的桥联应力，开裂后可以抑制裂缝宽度的进一步增大，并承担基体释放出的应力。同时，依靠界面黏结将应力传递到周围未开裂的基体，进而产生新的裂缝，最终在试件纯弯段表面产生大量近似平行的细密裂缝。试验过程中，测得 14 天时的抗弯强度为 14.93MPa，受拉初裂强度为 2.86MPa；28 天时抗弯强度为 16.03MPa，受拉初裂强度 3.10MPa。Maalej 和 Li 的研究结果表明，准脆性水泥基复合材料的抗弯强度与受拉初裂强度的比值与材料脆性比率相关，当脆性比率趋于无穷大时，这一比值为 1，对应的是理想的弹性脆性材料；当脆性比率趋于 0 时，这一比值为 3，对应的是理想的弹塑性材料。本次试验 14 天和 28 天极限抗弯强度与受拉初裂强度比值分别为 5.22 和 5.17，远高于 3。

与钢纤维混凝土试件相比，在四点弯曲试验中，PVA 纤维水泥基复合材料的极限抗弯强度是钢纤维混凝土的 1.6 倍，峰值荷载对应的跨中挠度值是钢纤维混凝土的 9 倍。在开裂后，钢纤维混凝土在短时间内能够维持较细的裂缝宽度水平，但是，开裂 137s 后裂缝宽度就迅速发展，并导致最终破坏，而 PVA 纤维水泥基复合材料在开裂后，能够长时间保持较细的裂缝宽度，开裂 1613s 后才发生裂缝局部化扩展。

近 10 年来，国内对 PVA 纤维水泥基复合材料的基本力学性能及其制备的研究进展迅速。大连理工大学徐世烺科研团队通过改进的直接拉伸试验方法对