

高性能纤维复合材料 土木工程应用技术指南

Guide for the Design and Construction of Fiber
Reinforced Plastics in Civil Engineering

陈小兵	主 编
李 荣	副主编
丁 一	

中国建筑工业出版社

高性能纤维复合材料土木工程 应用技术指南

Guide for the Design and Construction of Fiber
Reinforced Plastics in Civil Engineering

陈小兵 主 编
李 荣 副主编
丁 一

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能纤维复合材料土木工程应用技术指南/陈小兵主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2009
ISBN 978-7-112-11316-3

I. 高… II. 陈… III. 纤维增强复合材料-应用-土木工程-
指南 IV. TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 169223 号

本书的主要作者是国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》的主要参编人。本书全面系统地介绍了 FRP 材料在建筑结构加固领域中的设计、施工及检验方法; 汇集了国内外该领域的最新研究成果; 还针对 FRP 设计中常遇到的设计计算, 编制了计算分析软件。除了混凝土结构加固, 本书还针对砌体结构、木结构和钢结构的 FRP 加固技术进行了介绍。本书还介绍了国内外应用 FRP 材料的新型加固技术和工程实例, 以及配套组合技术, 如 FRP 网格 (CGR) 加固、嵌入式 (NSM) 加固、机械锚固快速加固 (MF-FRP) 等; 作为国标的重要补充, 希望能给读者带来启发和帮助。

本书对科研人员、设计人员、施工人员及材料厂商等都具有较大的参考价值。

责任编辑: 赵梦梅

责任设计: 崔兰萍

责任校对: 张虹 赵颖

**高性能纤维复合材料土木工程
应用技术指南**

Guide for the Design and Construction of Fiber
Reinforced Plastics in Civil Engineering

陈小兵 主 编

李 荣 副主编

丁 一

*

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

北京千辰公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 14 1/2 字数: 352 千字

2009 年 12 月第一版 2009 年 12 月第一次印刷

定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-11316-3

(18577)

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)

本书编写人员

主 编 陈小兵

副主编 李 荣 丁 一

编写人 阳 涛 陈 烈 王伟军 黄小龙 谭 壮

本书参编单位

中冶建筑研究总院有限公司

中国京冶工程技术有限公司

日本新日本石油株式会社

日本 KONISHI 株式会社

日本日米树脂株式会社

前言 Preface

自 1997 年国内第一个碳纤维加固混凝土梁的试验以来, FRP 结构加固技术在国内迅速发展, 已经成为钢筋混凝土结构主要的加固方法之一, 2003 年正式出版了中国工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》, FRP 材料在建筑结构上应用的国家技术标准和材料标准也正在编制之中, FRP 材料在建筑中的应用正经历着前所未有的发展时期。

相比几年前的状况, FRP 在建筑领域里的技术研究、应用又有了很大的发展, 设计计算方法更加成熟, FRP 产品更加丰富, 应用领域更加宽阔, 应用技术更加多样, 施工管理及质量检验也更加标准。在国际技术交流活动、科研活动及工程应用中我们认识到, 有必要编著一本能比较全面反映这些技术成果的技术指南, 为科研、设计、施工提供指导和参考。

本书的主要作者长期从事于 FRP 行业的科研、设计、施工及材料生产领域的工作, 在国内最先开展了 FRP 加固技术的研究及工程应用, 并作为主要起草人参与了多部 FRP 相关规范和标准的编制。在本书中我们力求能比较全面地介绍 FRP 材料在建筑结构加固领域中的设计、施工及检验方法, 特别是一些目前国内还没有推广应用的技术方法, 以及与其他加固技术的配套组合技术, 如 CGR 及 NSM 加固方法, 这些技术都是对现有的外部粘贴 FRP 片材加固技术的补充, 在很多情况下同外部粘贴 FRP 片材相比具有很大的技术优势, 能解决很多应用中的技术问题。本书中还介绍了 FRP 加固混凝土结构计算软件, 计算机设计软件的引入使设计工作更方便、使设计更能体现 FRP 材料的特性, 同时保证结构的安全及材料的经济。

在日本新日本石油株式会社、日本 KONISHI 株式会社、日本日米树脂株式会社等公司的支持鼓励下, 在中冶建筑研究总院有限公司的支持下, 共同完成了本书的编写工作。本书编写过程中日本新日本石油株式会社、日本 KONISHI 株式会社以及日本日米树脂株式会社提供了大量的技术及图片资料, 提出了很多宝贵的建议。

本书的编写还得到了很多朋友和公司的帮助, 在此要特别向关心并帮助过本书编写的日本 TEIJIN 公司、日本 TORAY 公司以及厦门博士泰公司表示衷心的感谢。

目录 Contents

第一章 序言 Introduction	1
1.1 外贴 FRP 片材加固技术	2
1.1.1 技术优势	3
1.1.2 研究与应用发展概况	3
1.2 FRP 用于新建结构	5
1.2.1 FRP 筋在新建结构中代替钢筋	5
1.2.2 FRP 结构及组合结构	6
1.3 相关标准、规范和指南	8
1.4 FRP 加固技术工程应用实例	9
1.4.1 钢筋混凝土结构加固	9
1.4.2 桥梁加固	14
1.4.3 构筑物加固	16
1.4.4 砌体结构加固	18
1.4.5 木结构加固	18
1.4.6 钢结构加固	19
1.4.7 纤维网格材 CGR 应用	19
1.4.8 嵌入式 NSM 加固	20
1.4.9 机械锚固快速加固 MF-FRP	20
参考文献	21
第二章 材料 Materials	23
2.1 纤维	23
2.1.1 碳纤维	23
2.1.2 玻璃纤维	24
2.1.3 芳纶纤维	24
2.1.4 力学性能指标	24
2.2 纤维布	25
2.2.1 碳纤维布	25
2.2.2 玻璃纤维布	28
2.2.3 芳纶纤维布	28
2.3 纤维增强复合材料	28
2.3.1 成型工艺	29

2.3.2	物理、力学性能	29
2.3.3	FRP 板材	30
2.3.4	FRP 筋	31
2.3.5	FRP 网格材	33
2.3.6	FRP 管	33
2.3.7	其他形式的 FRP 型材	34
2.4	粘贴 FRP 片材的配套树脂材料	34
2.4.1	底层树脂	35
2.4.2	找平材料	37
2.4.3	浸渍树脂	38
2.4.4	FRP 板胶粘剂	41
2.4.5	树脂材料的检测方法和标准	41
2.5	FRP 材料的耐久性及长期性能	42
2.5.1	湿热老化	43
2.5.2	冻融循环	44
2.5.3	紫外线	45
2.5.4	化学腐蚀	45
2.5.5	徐变	46
2.5.6	疲劳	46
2.5.7	电腐蚀	46
2.6	表面防护材料	47
	参考文献	47
第三章	粘贴 FRP 片材加固设计 Design of Externally Bonded FRP Laminate	49
3.1	加固设计基本概念及原则	49
3.1.1	加固设计前的准备	49
3.1.2	加固设计的基本特点及要求	50
3.1.3	FRP 片材的抗拉强度设计值	51
3.1.4	加固设计中的防火问题	53
3.2	抗弯加固	53
3.2.1	破坏模式	53
3.2.2	弯曲破坏极限弯矩的计算	54
3.2.3	剥离破坏	56
3.2.4	设计建议	60
3.2.5	预应力碳纤维片材加固	63
3.3	抗剪加固	63
3.3.1	抗剪加固设计基本概念	63
3.3.2	破坏模式	65

3.3.3 FRP 加固混凝土梁受剪承载力设计	66
3.3.4 FRP 加固混凝土柱受剪承载力设计	69
3.3.5 FRP 抗剪加固构造措施	70
3.4 柱加固	72
3.4.1 FRP 约束混凝土的应力-应变关系	73
3.4.2 柱截面形状的影响	75
3.4.3 FRP 约束柱的轴心抗压强度	76
3.4.4 FRP 加固偏心受压柱	79
3.5 抗震加固	80
3.5.1 FRP 抗震加固设计的基本概念及特点	81
3.5.2 柱的抗震加固	82
3.5.3 梁柱节点的抗震加固	86
3.5.4 剪力墙的抗震加固	87
3.5.5 小结	88
3.6 构筑物加固	89
3.6.1 无内压圆筒形结构	91
3.6.2 有内压圆筒形结构	93
3.7 桥梁加固	95
3.7.1 在旧桥加固中的应用	96
3.7.2 在新建桥梁中的应用	101
3.8 开洞加固	103
3.8.1 楼板开洞	103
3.8.2 剪力墙开洞	106
3.9 粘贴 FRP 片材加固有限元计算分析	106
3.9.1 基本假定	107
3.9.2 模型建立	107
3.9.3 参数设置	109
3.9.4 实例介绍	109
参考文献	113

第四章 粘贴 FRP 片材加固施工及工程质量控制 Installation of FRP System and

Quality Control	119
4.1 施工总则	119
4.1.1 施工可行性	119
4.1.2 施工安全性	120
4.1.3 施工工序	120
4.2 施工准备	121
4.2.1 施工现场条件	121

4.2.2	材料的选择及存放	122
4.2.3	施工工具及设备	122
4.3	基本施工技术	123
4.3.1	基层处理	123
4.3.2	粘贴纤维布的施工	125
4.3.3	粘贴 FRP 板材的施工	127
4.3.4	表面防护	129
4.3.5	施工安全注意事项	130
4.4	检验与验收	130
4.4.1	材料的检验	130
4.4.2	施工质量的检验	131
4.4.3	缺陷修复	131
4.5	项目监理及质量控制	132
第五章	其他类型结构加固 Other Types of Structures	135
5.1	砌体结构加固	135
5.1.1	技术优势	137
5.1.2	试验研究	137
5.1.3	设计方法	141
5.1.4	施工	146
5.2	木结构加固	147
5.2.1	技术优势	149
5.2.2	材料	150
5.2.3	试验研究	151
5.2.4	设计方法	153
5.2.5	施工	155
5.3	钢结构加固	156
5.3.1	技术优势	156
5.3.2	试验研究	158
5.3.3	设计方法	164
5.3.4	施工	165
	参考文献	167
第六章	其他类型 FRP 加固技术 Strengthening with Other Types FRP	171
6.1	FRP 网格加固法	171
6.1.1	技术优势	173
6.1.2	材料	174
6.1.3	试验研究	176

6.1.4	设计方法	178
6.1.5	施工	180
6.1.6	算例	182
6.2	嵌入式加固法	183
6.2.1	技术优势	184
6.2.2	材料	185
6.2.3	试验研究	186
6.2.4	设计方法	190
6.2.5	施工	192
6.2.6	其他领域的研究和应用	193
6.3	机械锚固快速加固法	194
6.3.1	技术优势	195
6.3.2	材料	195
6.3.3	试验研究	197
6.3.4	设计方法	201
6.3.5	施工	203
	参考文献	204
第七章	FRP 设计计算软件 FRP Design Software	207
7.1	概述	207
7.2	软件的主要功能及特点	207
7.3	粘贴 FRP 片材抗弯加固	208
7.3.1	基本假定	208
7.3.2	应力应变关系	209
7.3.3	剥离破坏	210
7.3.4	二次受力问题	211
7.4	粘贴 FRP 片材抗剪加固	212
7.4.1	碳纤维片材加固混凝土结构技术规程 (CECS 146: 2003)	212
7.4.2	纤维增强复合材料建设工程应用技术规范 (报批稿)	213
7.4.3	ACI-440 建议公式	215
7.4.4	欧洲设计规范建议公式	215
7.4.5	英国设计规范建议公式	216
7.4.6	加拿大设计规范建议公式	216
7.4.7	日本设计规范建议公式	216
7.4.8	Chen & Teng 公式	216
7.5	算例	217
	参考文献	220

第一章

序言

Introduction

纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer/Plastics, 简称 FRP) 问世于 20 世纪 40 年代, 依赖其优异的性能, 在航空、航天、国防、体育休闲用品等领域得到了广泛应用。随着经济的飞速发展, 人们对建筑物安全性、适用性和耐久性的要求不断增强, 对于新结构、新技术及新材料都提出了新的挑战。相对于传统的建筑材料, FRP 材料具有高强、轻质、耐腐蚀、可设计性强、低磁感应性、热膨胀系数小等突出的优点, 近年来成为土木建筑领域研究开发和应用的热点, 特别是在钢筋混凝土结构的补强加固领域。

FRP 材料在土木工程中的应用形式主要包括以下几个方面:

1. 用于结构加固: 外贴 FRP 片材加固、FRP 筋体外预应力加固、FRP 网格材等各类型材加固;
2. 在新建结构代替钢筋: FRP 筋混凝土结构、预应力 FRP 筋混凝土结构;
3. FRP-混凝土组合结构: FRP 管混凝土结构、FRP-混凝土组合梁、组合桥面板等;
4. FRP 结构: 全 FRP 桥、FRP 网架等。

自 1997 年国内第一个碳纤维加固混凝土梁的试验以来, FRP 材料应用技术在我国迅速发展, 2003 年正式出台了工程建设标准化协会标准《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[1], 新的《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》也即将颁布, 外贴 FRP 片材加固技术已经成为钢筋混凝土结构加固的主要方法之一。作为传统建材的一个重要补充, FRP 材料具有巨大的发展潜力。

相比几年前的状况, FRP 在建筑领域中的技术研究和应用有了很大的发展, 设计计算方法更加成熟, FRP 产品更加丰富, 应用领域更加宽阔, 应用技术更加多样, 施工管理及质量检验也更加规范。从所从事的国际技术交流以及科研活动、工程应用中, 我们认识到有必要编著一本能比较全面地反映近年来国内外 FRP 建筑工程应用领域的技术现状及发展方向的书籍, 为科研、设计及施工提供指导和参考。

本书的参编单位及编委都长期从事于 FRP 行业的科研、设计、施工及材料生产领域的工作, 在本书中我们力求能比较全面地介绍 FRP 材料在建筑结构加固领域中的材料、设计、施工及检验方法。本书精选汇集了国内外该领域的研究成果, 介绍了相关领域的发展方向, 对采用 FRP 加固设计的基本理念、设计方法、工程应用中的技术问题做了详细

介绍。本书还针对 FRP 设计中常遇到的设计计算编制了计算分析软件,可以使设计工作更方便、使设计更能体现 FRP 材料的特性,同时保证结构的安全性及材料的经济性。本书列举了国内外众多应用 FRP 材料的加固技术和工程实例,特别是一些目前国内还没有推广应用的技术方法,以及与其他加固技术的配套组合技术,如 FRP 网格 (CGR) 加固、嵌入式 (NSM) 加固等,这些技术都是对现有的外贴 FRP 片材加固技术的补充,已经被证明具有明显的技术优势和广阔的应用前景,但在国内还没有被推广应用,希望本书的出版能给读者带来启发,为这些技术的推广作出贡献。

作为 FRP 材料在土木工程中应用的主要领域,本书主要介绍钢筋混凝土结构补强加固中使用的 FRP 体系,其中主要包括纤维布、FRP 板材及 FRP 网格材。其他在建筑结构加固中应用较少的 FRP 筋材、FRP 型材、管材、索材只做简单介绍,由于目前实际工程中主要采用的是碳纤维材料,故除非有特别注明,文中相关内容主要是指碳纤维材料。

1.1 外贴 FRP 片材加固技术

外贴 FRP 片材加固是通过配套粘结树脂将 FRP 片材 (包括纤维布和 FRP 板) 粘贴于混凝土构件表面从而起到补强加固的作用,是 FRP 材料在土木建筑中最主要的应用形式。该技术包括两种应用方法,一种方法是纤维布在现场粘贴与树脂复合成一体图 1.1.1 (a),另一种方法是粘贴预制成型的 FRP 板材图 1.1.1 (b)

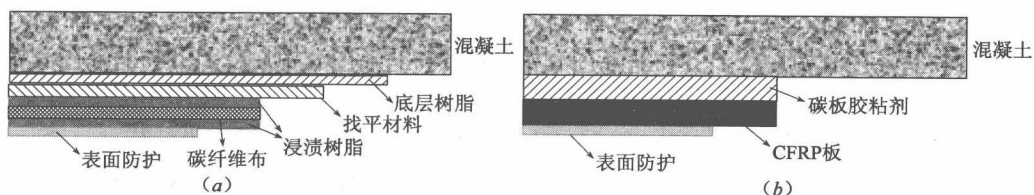


图 1.1.1 外贴 FRP 片材加固工法示意
(a) 外贴碳纤维布; (b) 外贴 CFRP 板

外贴 FRP 片材加固技术已经成为国际上被广泛应用的新型结构加固技术。图 1.1.2 为外贴碳纤维布对钢筋混凝土框架结构的梁、板、柱进行加固的工程实例照片。

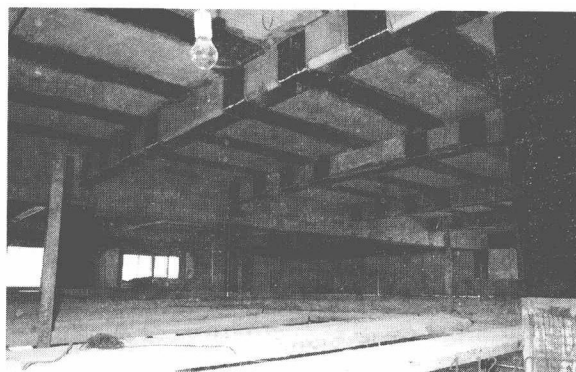


图 1.1.2 外贴 FRP 片材加固实例

1.1.1 技术优势

传统的混凝土结构加固方法主要有加大截面法、外包钢法、体外预应力加固、喷射混凝土、粘钢板加固等，都存在一定的缺陷，如增加结构自重、施工难度大、节点不易处理、易锈蚀等，相比之下，外贴 FRP 片材加固技术具有明显的优越性：

1. 高强高效

FRP 具有优异的力学性能，在加固修补混凝土结构中可以充分利用其高强度、高弹性模量的特点来提高混凝土结构的承载力和延性，改善结构受力性能，达到高效加固补强的目的，对于抗震加固尤其具有重要意义。

2. 不增加结构自重和截面尺寸

FRP 片材质量轻且薄，粘贴加固后对原结构自重和构件尺寸基本没有影响。

3. 施工便捷

FRP 加固施工不需大型机具，易于现场切割，施工占用场地少且没有湿作业，施工时对周围环境影响小，施工工期短，施工质量易保证。

4. 良好的耐久性和耐腐蚀性

FRP 材料可用于恶劣环境下桥梁、建筑等的加固修复，没有钢材普遍存在的锈蚀问题，可大大降低后期维护费用。

5. 适用面广

适用于各种结构类型、结构形状、结构部位的加固，如曲面、转角等，不改变结构形状且不影响结构外观。可广泛应用于钢筋混凝土梁、板、柱、墙体的加固，也可用于桥梁、隧道、筒仓、烟囱、电线杆的加固，还可以应用于砌体结构、木结构和钢结构的加固。

1.1.2 研究与应用发展概况

FRP 材料加固混凝土结构技术的研究始于 1984 年，瑞士联邦材料实验室^[2]进行了最早的碳纤维板加固钢筋混凝土梁的试验。20 世纪 80 年代，美国、日本和欧洲的一些国家相继开展了 FRP 加固混凝土结构技术的研究开发，主要采用外贴 FRP 片材对已有结构进行补强或抗震加固。

荷载增加、使用功能改变、设计失误、施工质量差或因遭受火灾、地震灾害等原因，都可能导致结构构件需要进行补强与加固。特别是在美国、日本的几次大地震中，许多建筑物和桥梁发生了倒塌或遭到严重损坏后（图 1.1.3、图 1.1.4），对抗震性能不足的结构进行抗震加固的需求日益突出。在震后损坏建筑结构的加固修复中，FRP 加固技术的优越性得到很好的验证，为该技术的推广应用提供了良好的契机。美国洛杉矶一幢七层旅馆的加固^[3]是使用 FRP 材料对钢筋混凝土柱进行抗震加固的一个成功范例。1992 年 6 月 28 日在 Landers 发生了 7.5 级地震，震中距该建筑 175km，结构柱出现了严重的斜向裂缝。震后对该建筑的结构柱采用外包玻璃纤维进行了加固，在加固结束后几个星期，又发生了 Northridge 地震（1994 年），在这次地震中该建筑没有受到任何损坏。1997 年日本用于加固补强的碳纤维布年使用量已突破 100 万 m²，并呈现逐年平稳增长的态势。



图 1.1.3 日本阪神地震中高架桥的破坏

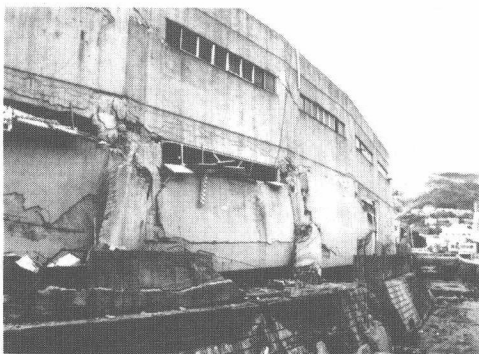


图 1.1.4 日本阪神地震中建筑物的破坏

我国对 FRP 加固技术的研究始于 1997 年，中冶建筑研究总院有限公司（国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心）于 1997 年 10 月进行了国内首批外贴碳纤维布加固梁试验（图 1.1.5）。国内首个工程应用实例为北京巨龙公司 1 号建筑梁板加固（图 1.1.6），由国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心于 1998 年 4 月完成。随后在短短几年中，外贴 FRP 片材加固技术已成为全国土木建筑行业研究和应用的热点，很快为市场所接受，而市场的扩大使材料的成本大幅下降，这为 FRP 材料在建筑中的应用发展提供了更大的可能，在我国已迅速发展成为建筑结构补强加固的主要技术。至 2005 年，国内应用于建筑加固补强的纤维布达到了 100 万平方米左右，从事 FRP 试验研究及技术开发的科研单位几十所，用于土木建筑行业中的碳纤维制品生产销售的厂家几十个，从事于碳纤维加固补强的专业公司上百个，已经形成了相当大的研发、生产、设计、应用的社会群体。

目前 FRP 材料在土木建筑中的应用以加固钢筋混凝土结构为主，加固的形式又以外贴 FRP 片材为主，但 FRP 技术在砌体结构、钢结构、木结构中的应用，以及采用 FRP 筋材、网格材、预应力 FRP 片材加固技术的应用已有很多，新的应用形式、新的产品、新的规范规程的研究正在世界各地广泛开展。



图 1.1.5 国内首个碳纤维布加固梁试验

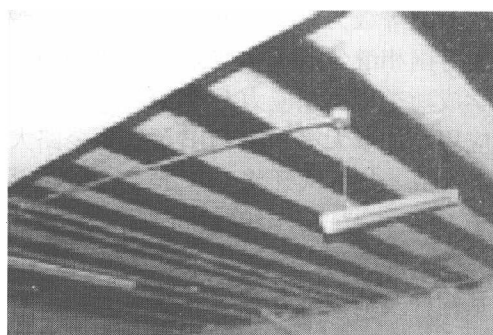


图 1.1.6 国内首个碳纤维布加固工程实例

1.2 FRP 用于新建结构

FRP 材料具有许多与传统建筑材料不同的特点，除用于结构加固以外，在新建结构中也有很大的发展空间，主要体现在：

1. 轻质高强，FRP 的比强度（强度与密度之比）是钢材的 20 ~ 50 倍，采用 FRP 材料可大大减轻结构自重，并可使大跨桥梁和建筑物的极限跨度大为增加。
2. 良好的耐腐蚀性，可用于港口工程、地下工程、桥梁、化工建筑等有特殊环境下要求的建构筑物。
3. 可设计性强，FRP 产品成型方便，形状可灵活设计。
4. FRP 为线弹性材料，在发生较大变形后还能恢复原状，对于承受较大动载和冲击荷载的结构较为有利。

FRP 材料还具有透电磁波、绝缘（CFRP 除外）、隔热、热膨胀系数小等其他优势，在一些特殊建筑中能够发挥其他建材难以取代的作用。

1.2.1 FRP 筋在新建结构中代替钢筋

传统钢筋混凝土结构中配置非预应力和预应力钢筋，在处于恶劣环境条件时，如干湿交替、化学介质等作用下，极易引起钢筋的腐蚀，严重影响结构的耐久性和适用性，甚至导致结构承载能力的降低。相比之下，防腐性能好、粘结性能与钢筋相差不多且抗拉强度高的 FRP 筋成为代替钢筋的一个较好选择。

20 世纪 60 年代初，美国 Marshall-Vega 公司生产出 GFRP 筋，用于解决近海地区和寒冷地区的钢筋混凝土结构遭受盐蚀危害问题。20 世纪 80 年代初开始，FRP 筋逐渐大量应用于有特殊性能要求的结构中代替钢筋，如有磁共振医疗设备的建筑及海堤、工业厂房屋面板等受严重化学侵蚀的结构物中。1985 年，美国 San Antonio 医院大楼的 MRI 设备的桩、柱和梁中均采用了 GFRP 筋。1986 年，San Antonio 的大学建筑中的边墙和钢筋混凝土梁中配置了 GFRP 筋。

20 世纪 70 年代初，德国首先开始研究采用 FRP 筋替代传统的高强钢丝修建预应力桥。1986 年，世界上第一座采用 GFRP 筋的预应力混凝土公路桥——Ulenberg Strass 桥建

成, 荷载等级为 60/30 级重交通荷载, 全桥共使用了 4tGFRP。欧洲的英国、瑞士、荷兰、丹麦等国相继建造了一些采用 FRP 预应力筋或索的桥梁。20 世纪 80 年代, 美国 Cornell 大学成功进行了预应力 FRP 束的试验, 开发了相应的连接锚固技术, 并在多项桥梁工程中应用。加拿大第一座 FRP 预应力公路大桥于 1994 年建成, 由采用 CFRP 预应力绞线的大梁组成。加拿大还将 FRP 预应力筋应用于 Taylor、Crowchild 和 Foffre 三座新建大桥上, 均于 1997 年建成, 经静载和动载试验, 效果非常理想。

FRP 筋的另一个应用对象是岩土工程, 目前已用于因潮汐变化等干湿交替的挡土墙、地基锚杆及地铁沉井等工程中。

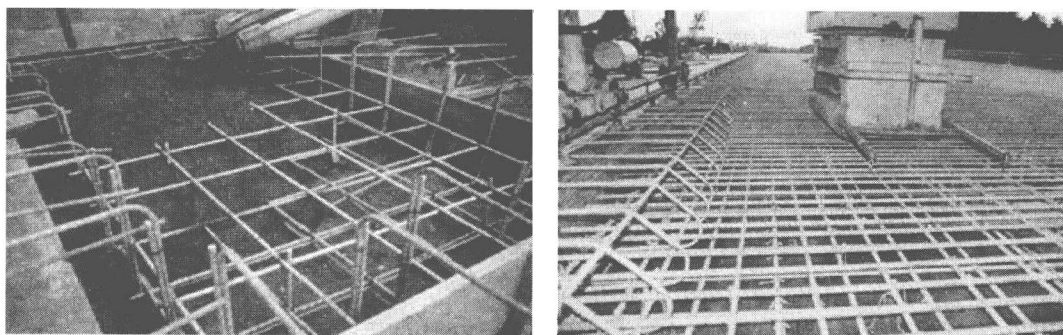


图 1.2.1 FRP 筋在新建结构中代替钢筋

1.2.2 FRP 结构及组合结构

由于 FRP 材料具有高强、轻质、耐腐蚀等优点, FRP 结构和 FRP 组合结构的应用也日益受到工程界的重视。FRP 结构是指主要结构构件完全采用 FRP 材料组成的结构, FRP 组合结构是指 FRP 材料与传统的结构材料 (主要是混凝土和钢材) 通过合理的组合, 共同承受荷载的结构形式。

1. 早期试验性的 FRP 结构

20 世纪 60 年代, 英国已开始生产 GFRP 复合材料的屋盖结构, 运往中东和北非建造使用, 1968 年一个采用 GFRP 夹心板与铝质骨架的圆顶结构建于利比亚 Benghazi; 1972 年阿联酋的 Dubai 国际机场, 采用 GFRP 伞状屋顶。20 世纪 70 年代及 80 年代初期, 英国的一些建筑采用了 GFRP 作为除梁柱以外的承重或半承重构件。1974 年, 第一个全复合材料建筑在英国 Lancashire 落成, 外形为三棱锥体组成的空间结构。早期的 FRP 结构, 大多带有一定的试验性质, 尚未在土木工程中形成规模。

2. 桥梁工程中的 FRP 结构构件

随着 FRP 生产技术和产品形式的迅速发展, FRP 结构在桥梁工程中得到迅速发展。英国、瑞士、丹麦、日本、美国及中国等国家, 均成功建造了一系列全 FRP 结构的人行天桥。同时, FRP 结构也被应用于承受较大反复动载的公路桥梁中。1982 年, 我国在北京密云建成了一座跨径为 20.7m 的 GFRP 蜂窝箱梁公路桥。1994 年, 英国建造的 Bond Mill 桥采用 GFRP 拉挤型材组合而成, 是一座可通过 40t 卡车的活动桥。1996 年, 美国 Kansas 州 Russell 架起了第一座采用 FRP 桥面板的公路桥。此后不到十年的时间里, 采用

FRP 桥面板的中小型桥梁在美国已有数十座。FRP 桥面板还被用于替换老化的混凝土桥面板。此外，FRP 索还可替代钢索用于斜拉桥和悬索桥。

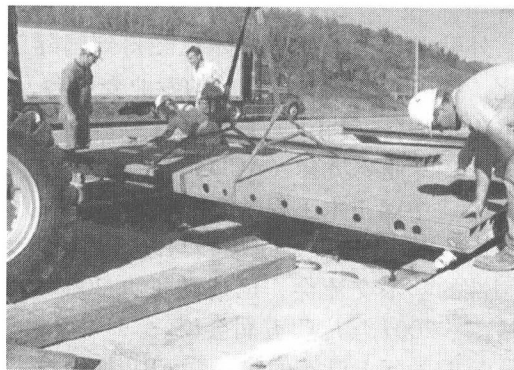
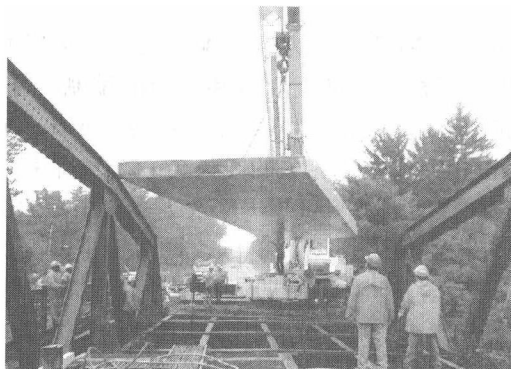


图 1.2.2 FRP 桥面板施工

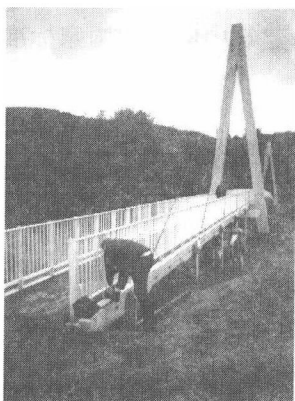


图 1.2.3 全 FRP 人行桥

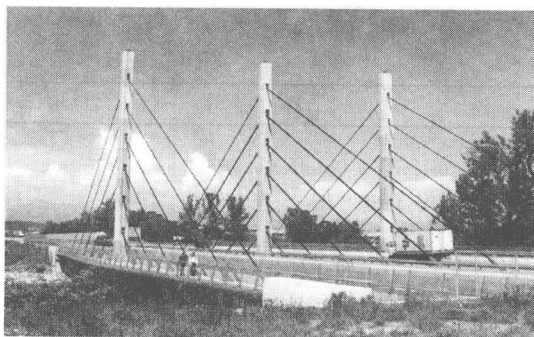


图 1.2.4 FRP 斜拉桥

3. FRP 用于大跨结构体系

利用 FRP 材料轻质高强的特点可以实现更大的跨度，目前已有 FRP 空间网架、轻质屋盖等成功的应用实例。



图 1.2.5 FRP 网架



图 1.2.6 FRP 屋盖