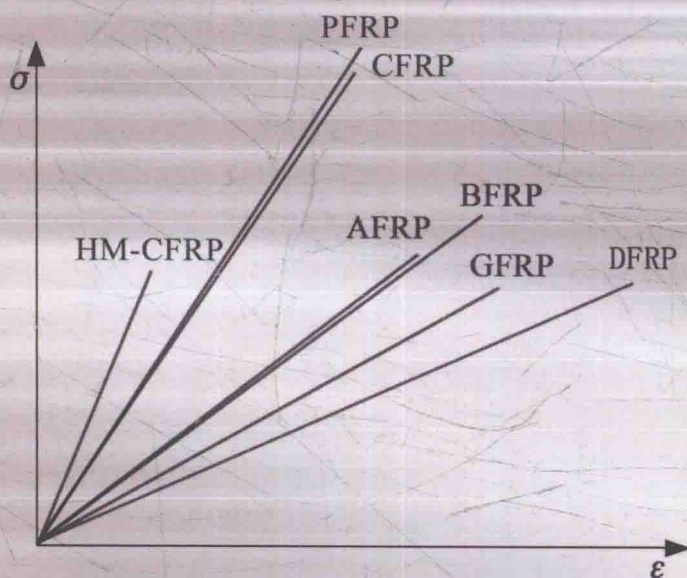




FRP增强工程结构体系

FRP Reinforced Engineering Structural Systems

吴智深 汪昕 吴刚 著



科学出版社

FRP 增强工程结构体系

FRP Reinforced Engineering Structural Systems

吴智深 汪 昕 吴 刚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书面向现代工程结构向大跨度、轻量化、长寿命的发展需求,论述了纤维增强复合材料(FRP)在解决各类民用建筑、桥梁工程、海洋工程、地下工程等结构中的设计评价方法和特色应用,重点从以下几个方面介绍最新研究成果和进展:从各类 FRP 的基本性能、长期性能、耐久性能等方面详述作为结构材料的 FRP 性能特点及性能提升方法;阐述了 FRP 筋增强混凝土结构的基本理论和高效应用方法,论述了其良好的力学性能和耐久性;基于组合结构可充分发挥各种材料性能优势的特点,阐述了 FRP 组合结构的基本原理、形式和性能特征;介绍了轻质、耐腐蚀的 FRP 全型材结构,阐述了解决结构轻量化、施工便利和提高结构耐久性等问题的实现途径;利用 FRP 拉索轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀、低蠕变、高阻尼等优异的性能,解决大跨结构向更大跨度、更轻质量、更长寿命跨越的实现方法;最后介绍了 FRP 在岩土、电力、高铁、化工等领域基础设施结构中的特色应用。

本书可供大专院校高年级学生和研究生学习 FRP 增强工程结构体系的基本知识,还可供土建、交通、水利等相关领域科研与工程技术人员追踪 FRP 增强工程结构体系最新热点和先进技术,并在工程实际中推广应用。

图书在版编目(CIP)数据

FRP 增强工程结构体系/吴智深,汪昕,吴刚著. —北京:科学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-03-045946-6

I. ①F… II. ①吴…②汪…③吴… III. ①纤维增强复合材料—工程结构 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 241208 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017 年 9 月第一次印刷 印张:26 1/2

字数:518 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

工程结构的每一次飞跃都伴随着建造材料的革命性发展,从远古时代的泥土,到古代社会的砖石、木材,再到近现代混凝土的发明和结构钢的使用,随着建筑材料种类的丰富和性能的不不断提升,工程结构的跨度、高度和规模也一次次得到质的提升。

随着社会的发展,人类对生存环境的要求不断提高,其中对各类房屋建筑、桥梁等基础设施工程结构的使用性能,以及服役寿命的要求也不断提升。虽然近100多年来钢筋混凝土结构和钢结构已发展成为目前工程结构的主要结构形式,但在不断需要提升的结构使用性能、可恢复性和耐久性面前,传统材料已越来越无法胜任。在此背景下,纤维增强复合材料(FRP)的出现为各类工程结构的再一次飞跃带来新的动力和支撑。

FRP在工程结构中的大规模应用始于1995年日本阪神地震后,采用碳纤维布粘贴加固技术在大规模受灾桥梁与建筑结构的修复中发挥巨大作用,随后纤维布粘贴加固成为结构加固工程的主流技术之一。此后FRP从纤维布不断发展到FRP板、FRP筋、FRP网格、FRP型材等多种形式,各类FRP制品成为提高结构抗震性能、使用性能,以及承载力加固和改造的重要手段。构成FRP的纤维种类也从初期的碳纤维发展到芳纶纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等,其中玄武岩纤维因其绿色环保并且具有极高的综合性价比的特点,在国内外得到广泛重视和大力发展,玄武岩纤维已成为结构加固FRP的一种重要选择。

在FRP成为工程结构加固重要手段的同时甚至更早,对FRP作为新建工程结构材料用于实现结构的高耐久性和轻量化的研究及应用也在不断地进行探索。从20世纪80年代开始,已不断采用FRP筋替代钢筋用于解决混凝土结构的腐蚀问题,利用FRP拉索设计建造钢拉索不能实现的更大跨度、更轻质量的大跨桥梁,以及利用FRP制造桥面板解决钢桥桥面的耐腐蚀问题等,然而这些探索和尝试虽然风靡一时,但都停滞不前未能发展成为标准化的工程结构形式,其根本原因在于早年的研究探索工作未能定量地实现FRP的耐久性和寿命设计问题,未能充分考虑FRP的离散性能,并且在设计中材料利用率不高,造成经济性较低。针对这些瓶颈问题,作者研究团队经过十多年的针对性研究,取得了一系列的突破和进展,较好地解决了早期FRP在新建结构中应用但未能得到推广的瓶颈问题,为今后大规模应用奠定了良好基础。本书较全面地反映了上述成果。经过国内外的

不懈努力,目前 FRP 作为新建结构的形式和应用方法正在不断丰富及完善,产生了一系列高效的 FRP 结构形式,如预应力 FRP 筋混凝土结构、FRP 混凝土组合结构、FRP 型材结构和 FRP 拉索结构等。此外,FRP 在新建结构中除实现结构性能提升外,还能附加发挥一系列特殊功能,如无磁性、绝缘性等。总而言之,FRP 在新建工程结构的建造中正发挥越来越重要的作用。

本书将针对 FRP 在新建工程结构中的典型和特色应用,结合作者研究团队多年的重要研究成果,从各类 FRP 的基本性能、长期性能、耐久性能等方面详述作为结构材料的 FRP 的性能特点,并结合复合材料特有的性能提升方法,介绍根据结构性能 FRP 适材所具有的可设计性、可提升性特点,在此基础上结合典型的工程结构应用形式,阐述 FRP 在混凝土/预应力混凝土结构、组合结构、全 FRP 结构、索结构及特殊结构中的应用形式、结构性能特点、设计理念和方法等关键内容,其中也包含一些最新的 FRP 设计应用理念。例如,采用 FRP 实现损伤可控可恢复的结构形式,利用 FRP 拉索实现大跨桥梁结构寿命可控设计等。希望通过本书不仅能给读者带来 FRP 及其增强结构的性能特点和设计方法方面的知识,更能够让读者理解如何根据结构性能需求来选择、设计 FRP 以实现工程结构综合高性能的理念和方法。

本书在撰写过程中得到了东南大学吕志涛院士的指导和关心,在此表示衷心的感谢。同时,本书的完成还得到黄璜、史健喆、杨亚强、赵杏、邓文杰、贺卫东、刘霞、蒋丽娟、徐鹏程、沈海彬、Mohamed Fahmy、孙泽阳、刘建勋、王子豪、黄泓蛟等的大力协助,在此一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

吴智深

2016 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 纤维增强复合材料及其基本性能	1
1.1 概述	1
1.2 FRP 的基本构成	5
1.2.1 纤维	6
1.2.2 基体	15
1.2.3 FRP	20
1.2.4 FRP 制备成型方法	22
1.3 FRP 短期基本力学性能	28
1.3.1 拉伸性能及性能设计	28
1.3.2 压缩性能	40
1.3.3 剪切性能	43
1.3.4 层间剪切性能	45
1.3.5 弯曲性能	50
1.4 FRP 长期疲劳蠕变性能	52
1.4.1 疲劳性能	52
1.4.2 蠕变性能	64
1.5 FRP 在温度作用下的力学性能	69
1.5.1 耐高温性能	70
1.5.2 低温性能	78
1.6 FRP 耐腐蚀性能	83
1.6.1 腐蚀机理	83
1.6.2 耐腐蚀性能	86
1.6.3 耐腐蚀性能提升方法	91
1.7 FRP 抗冲击性能	94
1.7.1 冲击破坏形态和机理	94
1.7.2 多种 FRP 抗冲击性能的比较	95
1.7.3 抗冲击性能的影响因素	96

1.8 FRP 自传感性能	97
1.8.1 自传感性能实现途径	97
1.8.2 自传感性能评价	101
1.9 FRP 力学性能数据库建立	104
1.10 小结	106
参考文献	106
第 2 章 FRP 筋及预应力 FRP-筋混凝土结构体系	113
2.1 概述	113
2.2 FRP 筋性能特点	115
2.2.1 FRP 筋的基本特点	115
2.2.2 FRP 筋力学性能	116
2.2.3 FRP 筋生产工艺	117
2.2.4 普通混凝土结构用 FRP 筋性能	118
2.2.5 预应力混凝土结构用 FRP 筋性能	119
2.3 FRP 筋与混凝土的黏结滑移	122
2.3.1 FRP 筋与混凝土的黏结作用机理	123
2.3.2 FRP 筋-混凝土拉拔试验及黏结破坏形式	126
2.3.3 FRP 筋-混凝土黏结性能及影响因素	128
2.3.4 黏结滑移模型	130
2.4 FRP 筋增强混凝土结构	134
2.4.1 全 FRP 筋增强混凝土结构	134
2.4.2 FRP 筋-钢筋混合配置混凝土结构	145
2.4.3 FRP 筋珊瑚礁砂混凝土结构	151
2.4.4 FRP 自传感筋增强混凝土结构	154
2.4.5 全 FRP 筋混凝土结构配筋算例及经济性比较	160
2.5 预应力 FRP 筋混凝土结构	165
2.5.1 性能和特点概述	165
2.5.2 有黏结预应力 FRP 筋混凝土结构	169
2.5.3 体内无黏结预应力 FRP 筋混凝土结构	172
2.5.4 体外预应力 FRP 筋混凝土结构	173
2.6 损伤可控 FRP 筋混凝土结构	177
2.6.1 损伤可控结构的概念	177
2.6.2 混凝土柱损伤可控实现方法	179

2.6.3 FRP 筋-钢筋增强混凝土损伤可控结构	181
2.6.4 SFCB 筋增强混凝土损伤可控结构	185
2.6.5 损伤可控结构的动力性能	185
2.7 小结	187
参考文献	188
第3章 FRP 组合结构	192
3.1 概述	192
3.1.1 FRP-混凝土组合梁板结构的研究与发展	193
3.1.2 FRP 管混凝土柱结构的研究与发展	195
3.1.3 FRP-金属组合结构的研究与发展	196
3.2 FRP 组合结构材料性能	197
3.2.1 传统组合结构材料特性	197
3.2.2 FRP 组合结构材料特性	198
3.2.3 FRP 组合结构材料形式	200
3.3 FRP 组合结构连接性能	201
3.3.1 FRP-混凝土组合梁板的连接形式及性能	201
3.3.2 FRP 管混凝土柱的连接形式及性能	204
3.3.3 FRP-金属组合结构的连接形式及性能	204
3.3.4 FRP 组合结构连接性能测试方法	205
3.4 FRP-混凝土组合梁板结构	206
3.4.1 FRP-混凝土组合梁板基本结构形式	206
3.4.2 FRP-混凝土组合梁板基本结构力学性能	206
3.4.3 FRP-混凝土组合梁板长期力学性能	210
3.4.4 FRP-混凝土组合结构性能提升方法	212
3.4.5 FRP 波纹腹板-混凝土组合箱梁的特殊应用	215
3.4.6 FRP-混凝土组合梁板结构设计方法	217
3.4.7 FRP-混凝土组合梁板典型工程应用	226
3.5 FRP 管混凝土柱结构	228
3.5.1 FRP 管混凝土柱基本结构形式及特点	228
3.5.2 FRP 管混凝土柱轴压性能	229
3.5.3 FRP 管混凝土柱偏压性能	231
3.5.4 FRP 管混凝土柱抗震性能	232
3.5.5 FRP-混凝土-钢双壁管构件	233
3.5.6 FRP-混凝土-钢双壁管构件基本性能	235
3.5.7 新型的钢-混凝土-FRP 管-混凝土构件	236

3.5.8 FRP 管混凝土柱及 FRP-混凝土-钢双壁管构件结构设计方法	237
3.6 FRP-金属组合结构	241
3.6.1 FRP-铝合金组合结构基本结构形式及特点	241
3.6.2 FRP-铝合金组合结构性能研究	244
3.6.3 FRP-钢组合结构基本结构形式及特点	246
3.6.4 FRP-钢组合结构性能研究	247
3.7 小结	248
3.7.1 FRP-混凝土组合梁/板体系	248
3.7.2 FRP 管混凝土柱	249
3.7.3 FRP-金属组合结构	250
参考文献	250
第 4 章 全 FRP 型材结构	253
4.1 概述	253
4.1.1 全 FRP 型材结构的主要结构形式	254
4.1.2 全 FRP 结构连接方法	254
4.2 全 FRP 结构用 FRP 性能	260
4.2.1 全 FRP 结构材料生产及其对性能的影响	260
4.2.2 全 FRP 结构用 FRP 拉挤型材单向受力性能	261
4.2.3 全 FRP 结构用 FRP 的疲劳性能	262
4.2.4 全 FRP 结构用 FRP 拉挤型材耐久性能	263
4.3 全 FRP 结构的破坏形式	266
4.3.1 强度破坏	266
4.3.2 屈曲破坏	267
4.3.3 组件间的连接破坏	267
4.3.4 疲劳破坏	267
4.4 设计考虑因素	268
4.4.1 强度和刚度设计	268
4.4.2 稳定设计	268
4.4.3 荷载作用下的长期性能设计	268
4.4.4 动力性能设计	269
4.5 FRP 桥面板结构	269
4.5.1 拉挤成型式 FRP 桥面板	270
4.5.2 FRP 夹心桥面板	271
4.5.3 典型工程应用	273
4.6 FRP 桁架结构	274

4.6.1 拉挤型桁架	275
4.6.2 编织型桁架	275
4.6.3 分析方法与优化设计示例	275
4.6.4 典型工程应用	281
4.7 其他型材结构形式	285
4.7.1 FRP 型材网架结构	285
4.7.2 FRP 薄板结构	286
4.7.3 网壳体系	287
4.7.4 板片空间结构体系	288
4.7.5 FRP 编织网体系	288
4.7.6 FRP 隧道衬砌	289
4.8 小结	291
参考文献	292
第 5 章 FRP 拉索结构	295
5.1 概述	295
5.2 FRP 拉索力学性能	296
5.2.1 FRP 拉索拉伸性能	297
5.2.2 FRP 拉索疲劳性能	298
5.2.3 FRP 拉索蠕变性能	298
5.2.4 FRP 拉索振动特性	299
5.2.5 FRP 拉索阻尼性能	299
5.3 FRP 拉索形式及锚固体系	300
5.3.1 FRP 拉索黏结型锚固方法	300
5.3.2 FRP 拉索摩擦型锚固方法	304
5.3.3 FRP 拉索夹片型锚固方法	306
5.3.4 FRP 拉索整体型锚固方法	308
5.4 FRP 拉索大跨斜拉桥	314
5.4.1 静力性能	315
5.4.2 动力学性能	316
5.4.3 FRP 拉索优化设计理念和方法	319
5.4.4 2000m 级 FRP 拉索大跨斜拉桥设计方案	323
5.4.5 典型 FRP 拉索斜拉桥	336
5.5 FRP 拉索超大跨悬索桥	340
5.5.1 FRP 拉索悬索桥的基本性能	340
5.5.2 FRP 拉索悬索桥的静力性能	342

5.5.3	FRP 拉索悬索桥的动力性能	342
5.5.4	FRP 拉索悬索桥的经济性能评估	345
5.5.5	典型 FRP 拉索悬索桥结构	346
5.6	其他 FRP 索结构	348
5.6.1	FRP 系杆拱桥	349
5.6.2	FRP 拉索张弦结构桥	350
5.6.3	FRP 索悬挂结构	351
5.7	小结	352
	参考文献	353
第 6 章	FRP 特殊结构	355
6.1	岩土工程中的应用	356
6.1.1	支护锚杆	356
6.1.2	桩结构应用	360
6.1.3	支护土钉	362
6.1.4	FRP 网格新应用	364
6.1.5	现存问题	366
6.2	输电杆塔结构系统	367
6.2.1	杆塔工艺技术	369
6.2.2	杆塔设计标准及试验方法	370
6.2.3	杆塔产品与应用	371
6.2.4	输电杆塔修复	374
6.2.5	输电线用纤维复合芯	375
6.2.6	输电杆塔防腐地基	381
6.2.7	输电杆塔地脚螺栓	382
6.2.8	现存问题	384
6.3	风力发电叶片结构	384
6.3.1	风力发电叶片材料应用	385
6.3.2	风力发电叶片工艺提升	386
6.3.3	风力发电叶片产品开发	387
6.3.4	现存问题	388
6.4	无砟轨道板	389
6.4.1	无砟轨道应用	390
6.4.2	现存问题	392
6.5	防磁结构	393
6.5.1	防磁应用	393

6.5.2 现存问题	396
6.6 防爆结构	396
6.6.1 防爆应用	396
6.6.2 现存问题	397
6.7 防火结构	398
6.7.1 民用防火材料	398
6.7.2 军用方舱防火材料	399
6.7.3 现存问题	401
6.8 防腐蚀结构设施	401
6.8.1 排气烟囱	402
6.8.2 大口径供水管道	403
6.8.3 储罐	404
6.8.4 海洋工程用复合材料	405
6.8.5 现存问题	409
参考文献	409

第 1 章 纤维增强复合材料及其基本性能

1.1 概 述

纤维增强复合材料(fiber-reinforced polymer or plastics, FRP)在土木工程应用领域特指连续纤维增强复合材料。FRP 是由纤维和树脂基体通过一定工艺固化后形成的具有一定或特定形状的结构材料,其中纤维一般包括碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等,树脂有环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和聚酯树脂等。形成的 FRP 制品按纤维种类分为碳纤维 FRP(carbon FRP, CFRP)、芳纶纤维 FRP(aramid FRP, AFRP)、玄武岩纤维 FRP(basalt FRP, BFRP)、玻璃纤维 FRP(glass FRP, GFRP)等,按制品形式分为片材(布、薄板等)、筋材(光面筋、肋纹筋、缠绕筋等)、索材(平行索、绞索等)、型材(具有一定截面形状的制品,如管材、工字形材等)、网格材(包括硬质的网格和柔性的格栅)等,如图 1.1 所示。

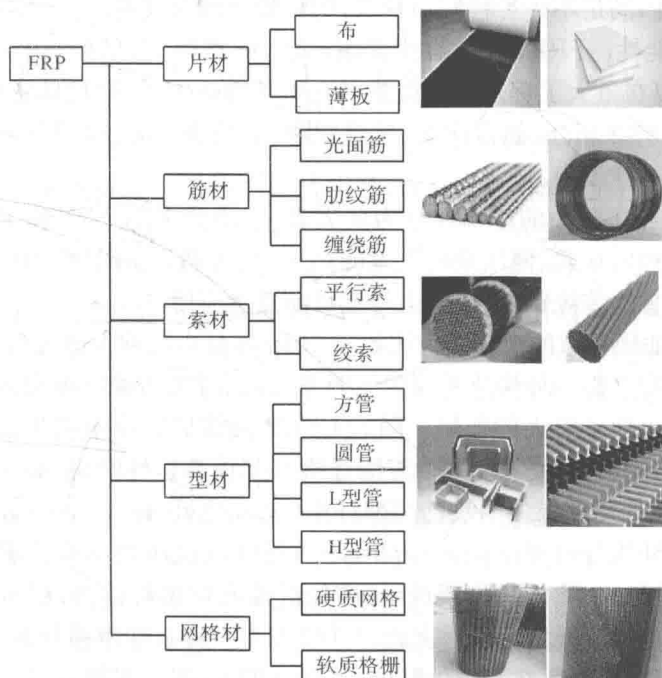


图 1.1 土木工程用典型 FRP 制品

相对于传统建筑材料(钢材、混凝土、木材、铝合金等),FRP 具有优越的力学(高比强度)和物理化学性能(轻质、耐腐蚀等),以及其他功能性特点如绝缘(除碳纤维复合材料弱导电)、耐高低温等,其性能特点如下^[1~5]所述。

(1) 轻质。FRP 的密度低,只有钢材的 $1/5 \sim 1/4$,普通素混凝土的 $70\% \sim 80\%$ 。

(2) 高强。FRP 拉伸强度为普通低碳钢的 $4 \sim 10$ 倍以上,与预应力钢丝/索相当甚至更高。可以作为轻质高强结构构件,实现更大的结构跨度或更加轻量化的结构。

(3) 耐腐蚀性能优越。FRP 对酸、碱、盐等各类腐蚀具有较强的抵抗能力,其中 CFRP 耐各种腐蚀性能最强,BFRP 次之,GFRP 相对较弱,特别是耐碱腐蚀能力较弱。在强酸碱、海洋恶劣腐蚀环境中,钢筋混凝土结构一般 $5 \sim 15$ 年会出现因钢筋腐蚀造成的顺筋裂缝, $20 \sim 30$ 年破坏。而合理利用 FRP 建造的结构在海水中的预测服役寿命可以达到 100 年以上。

(4) 耐疲劳性能优越。FRP 的疲劳强度和承载疲劳荷载应力幅都要远高于普通钢筋,采用 FRP 作为承受动荷载的结构构件,可有效提升结构的疲劳寿命。

(5) 良好的可设计性。因为构成 FRP 的纤维种类多且性能各有特点,可以通过性能互补的不同纤维以及纤维与传统材料(包括钢材、木材、竹集成材等)进行混杂/复合设计,满足不同工程结构要求,同时降低综合成本。

(6) 多功能性。FRP 的功能,如无磁性能、吸波性能、低的热传导系数、高吸音系数等,可以在重大工程及相关设施中发挥其特殊作用,取代低磁钢材、铜筋等材料用于一些特殊场合,如雷达站、地磁观测站、消磁设施、医疗核磁共振设备等基础设施结构的建设中。

FRP 在土木工程中的应用可分为两大类:一类为采用 FRP 作为结构修复材料加固既有结构的承载、使用或耐久性能;另一类为利用 FRP 作为结构增强材料在新建结构中替代传统钢筋、混凝土等建材而直接应用。

CFRP 在加固领域的大规模应用始于 1995 年日本阪神大地震后,大规模受灾桥梁与建筑结构急需一种快速有效的加固方法,此时采用碳纤维布的外粘贴技术在抗震加固中发挥了极大的作用。随后 CFRP 抗震加固技术成为结构抗震加固工程界的主流应用技术之一,同时芳纶纤维及其他高延性纤维,如超高分子量聚乙烯纤维,以及聚对苯二甲酸乙二酯纤维(polyethylene terephthalate)、聚萘二甲酸乙二醇酯纤维(polythylene naphtalate)等纤维也作为结构抗震加固的一种选择。到 21 世纪初,除传统的碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维外,绿色综合高性能的玄武岩纤维也得到开发应用。玄武岩纤维作为一种结构增强材料,可替代碳纤维、玻璃纤维等纤维材料在结构外贴加固、网格加固、嵌入式加固等应用领域得到广泛重视和深入研究,BFRP 因较高的性价比和良好的短、长期性能而得到大量应

用。近年来,越来越多的桥梁建筑在应用 FRP 加固增强后,性能得到显著提升。例如,澳大利亚西门大桥采用 40 多公里碳纤维布进行加固,2011 年“3·11”日本东北大地震后铁路高架桥加固中显示了 FRP 优于钢材的加固效果等。据统计,在中国近一半的工程关键部位加固中应用了 CFRP、BFRP 等高性能纤维材料,如江阴长江大桥、北京人民大会堂的加固等,可见 FRP 在结构使用性、耐久性及抗震性能加固等方面的实际应用已大大推动了 FRP 产业发展。从应用形式上看,FRP 在土建交通基础设施中的应用已由单一的纤维布外贴结构加固,发展到预应力纤维布加固、板条加固、FRP 网格加固、嵌入式加固及体外预应力索加固等多种形式^[6,7],如图 1.2 所示。

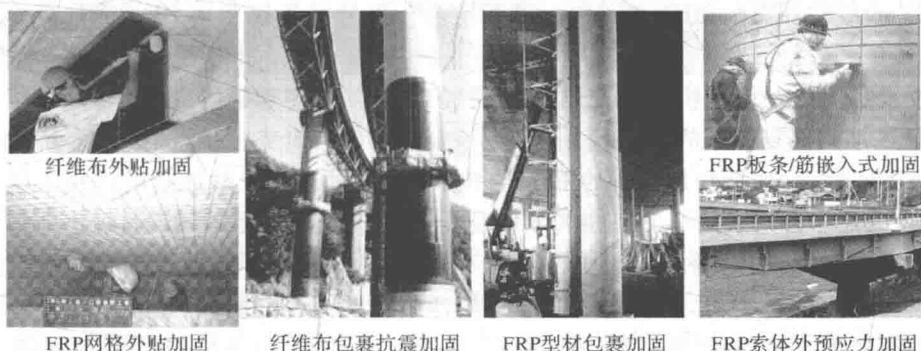


图 1.2 FRP 加固结构

在 FRP 加固应用领域,对 FRP 的性能、测试方法和增强结构设计方法展开了大量的研究,成果反映在各国的工程结构技术标准及指南中。日本在 20 世纪 90 年代中期已形成 FRP 的性能测试和应用方法(JSCE 1997^[8]),其后针对逐渐成熟的碳纤维布加固方法,提出纤维布的性能评价和外贴加固方法规程(JSCE 2001^[9])。欧洲对 FRP 筋在混凝土结构中的应用也较早开展了研究,并于 2001 年形成设计规范(fib 2001^[10]、NRC 2004^[11])。此后,加拿大(ISIS 2001^[12]、CSA 2002^[13])、美国(ACI 440. IR-06^[14])等发达国家均陆续颁布 FRP 加固既有结构的设计和施工指南。作为一个在节能、环保和防灾领域走在世界前沿的国家,日本的土木工程学会在 2004 年组织国内主要的产学研力量,成立 FRP 在土木工程中应用的研究委员会。该委员会在 2005 年的报告中明确展望了 FRP 在海洋结构、港口、桥梁、地下结构、抗震防灾等工程领域的应用前景,但同时指出人们在对 FRP 增强结构的长期性能、全寿命设计、国际化产业规范等方面的认识不够深入,限制了 FRP 在土木工程中更广泛的应用。国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO) TC71 工作组近来在征求各国意见的基础上,也已制定了关于 FRP 增强结构(包括新结构和既有结构)的设计指南初稿。中国开

始 FRP 加固结构研究的时间相对滞后,但随着国家的大力支持和研究的不断深入,于 2010 年颁布《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010^[15])、《结构加固修复用玄武岩纤维复合材料》(GB/T 26745—2011)^[16]、《结构工程用纤维增强复合材料筋》(GB/T 26743—2011)^[17]、《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》(GB/T 31539—2015)^[18]等一系列产品和应用标准。另外,结构工程用纤维增强复合材料网格、结构用纤维增强复合材料索及锚具等特色 FRP 制品的产品标准也在编制中。这些标准及规范的不断完善,推动了 FRP 在土木工程加固中的应用。

FRP 在新建结构中的探索从 20 世纪 70 年代开始,其规模化研究和应用^[1~14]始于 80 年代,欧洲、美国、日本等国家和地区首先开始探讨利用 FRP 筋代替传统钢筋解决混凝土结构的腐蚀问题,同时一些前瞻性研究,如利用 CFRP 拉索代替钢拉索实现更大跨度桥梁也在这一时期提出^[19]。这些基础研究工作为 90 年代 FRP 在加固修复领域的快速应用奠定了基础。90 年代美国、欧洲的很多桥梁由于腐蚀问题突出,特别是钢桥的桥面板和桥墩在腐蚀环境及融冰盐的作用下耐久性差,因此多种形式的全 FRP 或 FRP-混凝土组合桥面板、FRP 管-混凝土柱得到设计开发,替代原先钢筋混凝土桥面板和混凝土桥梁,实现了良好的耐久性能。与结构加固材料类似,玄武岩纤维作为新建结构的高性能材料,也在结构设计中得到认可和应用,特别是玄武岩纤维作为筋、索、网格、型材等增强材料,在混凝土建筑、桥梁结构中得到广泛重视和应用。例如,中国沿海开发中应用玄武岩纤维筋作为高耐久结构材料、地震台建筑中采用玄武岩纤维筋实现高耐久性和无磁性功能、路面混凝土基础采用玄武岩纤维筋/网格等实现高耐久性等。采用多种形式的 FRP 制品与传统建筑材料结合,建造具有轻量化、长寿命和高综合性能的房屋、桥梁、道路等结构形式,是近年来 FRP 在土木工程结构中不断得到推广应用的方向。本书重点介绍 FRP 在新建结构中的不同应用形式,其典型结构如图 1.3 所示。

针对 FRP 在新建结构中的广泛应用前景,各国的规范或设计指南也在研究和应用的基础上不断推出。日本土木学会最早推出 FRP 筋的材料测试方法,加拿大、美国、欧洲之后也推出 FRP 筋及预应力 FRP 筋在混凝土结构中的应用标准或设计规范(fib 2007^[20]、ISIS 2001^[21]、CSA 2002^[13]、ACI 440.2R-08^[22])等。中国对 FRP 新建结构的研究和应用起步相对较晚,于 2010 年颁布国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010),其中包括 FRP 筋及预应力 FRP 筋混凝土结构、组合结构等结构设计方法,目前该规范正在修订中,除不断完善各种结构设计方法外,还将增加 FRP 网格结构设计方法、玄武岩纤维筋作为预应力材料的设计应用方法等。总之,随着设计规范和产品标准的不断完善,FRP 在新建结构中的应用将越来越广泛。

另外,FRP 在新建土木工程中的应用有其设计的特殊性,与其在航天航空中



图 1.3 FRP 新建结构应用形式

的应用相比,主要是发挥 FRP 的比强度和比模量高的明显优势。而且,随着从材料到结构体系安全可靠设计理论的创新不断终使大型 FRP 航空航天结构(如大飞机)实现从不可能到可能、从无到有的突破。由于成本控制问题更为关键,与航空航天结构相比,土建结构中使用的 FRP 的材料、制备过程等有显著区别。另外,FRP 在增强土建结构中的应用需要满足综合性能要求及更复杂功能要求。具体地说,为了满足土建结构对使用性和安全性的双重要求,FRP 及其增强构件需要在强度、刚度、延性及长期耐久性四个方面达到所需指标,包括抵御极端荷载(如火灾、地震、爆炸等)及极端腐蚀环境的能力。尤其重要的是,由于土建结构一般至少需要保证 50 年以上的使用寿命,而重大工程结构的服役寿命往往要达 100 年以上,比在其他工业领域对 FRP 长期耐久性的要求更为严格。尽管 FRP 存在很多传统结构材料所不具备的优势,但实现其在重大结构的关键应用仍面临极大挑战^[23]。

世界各国近 30 多年在建立设计标准方面的上述研究无不表明 FRP 在土建交通基础设施领域的重要性和广阔应用前景。FRP 及其增强结构因其巨大的应用潜力也已成为国际土木工程领域中方兴未艾的学科热点和发展方向,尤其是中国大规模基础建设的重大需求以及纤维复合材料的巨大产能为 FRP 增强结构技术提供巨大的市场潜力。

1.2 FRP 的基本构成

FRP 由纤维增强材料和树脂基体材料通过一定的工艺形成,因此要理解 FRP