

纤维增强复合材料 建设工程应用技术

—— 试验、理论与方法

Application of Fiber Reinforced Polymer
in Construction: Experiment, Theory and
Methodology

冯 鹏 陆新征 叶列平 著 ■

中国建筑工业出版社

纤维增强复合材料建设工程应用技术

——试验、理论与方法

冯 鹏 陆新征 叶列平 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

纤维增强复合材料建设工程应用技术——试验、理论与方法/
冯鹏, 陆新征, 叶列平著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-112-12746-7

I. ①纤… II. ①冯… ②陆… ③叶… III. ①纤维增强复合材料-应用-土木工程 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 247979 号

纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP) 作为一种新型高性能工程结构材料, 开始受到我国土木工程技术人员和研究人员的关注, 并成为结构工程发展的一个新方向。本书详细介绍了清华大学近年来对纤维增强复合材料在土木工程中应用所进行的研究成果, 包括: 绪论, FRP 材料, 复合材料力学概述, FRP 约束混凝土, FRP-混凝土界面性能, 抗震加固, 抗剪加固, 抗弯加固, 砌体加固, FRP 桥面结构及 FRP 组合梁、板等共 11 章内容。

本书可供从事纤维增强复合材料工程应用和研究的相关人员参考。

* * *

责任编辑: 赵梦梅 李天虹

责任设计: 赵明霞

责任校对: 陈晶晶 关 健

纤维增强复合材料建设工程应用技术

——试验、理论与方法

冯 鹏 陆新征 叶列平 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

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 字数: 646 千字

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-12746-7

(20019)

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

1997年,我国开始在混凝土结构加固领域引入粘贴碳纤维布加固技术,并开展了相应的研究,目前这项技术已在我国得到成功推广应用。随后,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,简称FRP)作为一种新型高性能工程结构材料,开始受到我国土木工程技术人员和研究人员的关注,并成为工程结构发展的一个新方向。在国家自然科学基金(50238030)和国家863计划(2001AA336010)等项目的资助下,本书作者与其他合作者对FRP材料在土木工程结构领域应用的基础理论和设计计算方法进行了系统深入全面的试验和理论研究,取得了一系列的成果。为在我国土木工程结构领域推广应用FRP材料,介绍有关设计计算理论,促进相关研究工作的进一步开展,本书作者将近年来清华大学所完成的主要研究工作进行了总结。本书内容包括:绪论,FRP材料性能,复合材料力学概述,FRP约束混凝土,FRP-混凝土界面性能,混凝土柱的抗震加固,混凝土构件的抗剪加固,混凝土梁板的抗弯加固,砌体结构加固,FRP桥面结构,FRP组合梁、板,共11章内容。本书中的大部分研究内容为国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)的编制提供了技术背景。

本书第1、2、3、10、11章由冯鹏和叶列平共同撰写,第4、5、6、7、8、9章由陆新征和叶列平共同撰写,全书最后由冯鹏负责整理。

本书是基于清华大学的博士后和研究生共同完成的研究成果整理形成的,参加研究工作有:博士后杨勇新;博士研究生冯鹏、陆新征、张轲、钱鹏、郑云、李静、曲哲;硕士研究生赵树红、方团卿、谭壮、林磊、胡伟红、刘英磊、黄羽立、鲁国昌、庄江波、沙吾列提·拜开依、李天虹。在整个研究工作中,得到了国际FRP土木工程应用学会主任及香港理工大学滕锦光教授、中国FRP及其工程应用委员会主任岳清瑞教授、日本茨城大学吴智深教授、英国爱丁堡大学陈建飞博士以及其他国内外合作者和FRP制造厂家的帮助和支持。本书的主要研究工作得到了国家自然科学基金重点基金(50238030)和国家863计划(2001AA336010)等项目的资助,出版得到了国家自然科学基金专项主任基金(51048004)的支持,在此也表示衷心感谢。

由于作者水平有限,本书一定存在许多不足和错误,欢迎有关专家和读者提出宝贵意见。

冯鹏 陆新征 叶列平

2010年12月

于清华园

目 录

第1章 绪论	1
1.1 FRP 材料的特点	2
1.2 FRP 在工程结构加固补强中的应用	4
1.3 FRP 筋和预应力 FRP 筋混凝土结构	5
1.4 FRP 结构及 FRP 组合结构	6
本章参考文献	12
第2章 FRP 材料	17
2.1 FRP 材料的组成	17
2.2 FRP 的制备工艺	21
2.3 FRP 材料性能的设计取值	23
本章参考文献	28
第3章 复合材料力学概述	29
3.1 复合材料力学基础	29
3.2 单层板分析	32
3.3 层合板分析	37
3.4 FRP 的强度与破坏	39
本章参考文献	43
第4章 FRP 约束混凝土	44
4.1 概述	44
4.2 FRP 布约束混凝土圆柱	45
4.3 FRP 管约束混凝土圆柱	65
4.4 FRP 布约束混凝土方柱	83
4.5 FRP 约束混凝土计算方法	85
本章参考文献	88
第5章 FRP-混凝土界面性能	90
5.1 概述	90
5.2 FRP-混凝土界面受力状态	90
5.3 FRP-混凝土界面性能试验	92

5.4 FRP-混凝土界面破坏机理	97
本章参考文献	118
第6章 抗震加固	121
6.1 概述	121
6.2 清华大学李静等的试验研究	122
6.3 清华大学胡伟红等的试验研究	131
6.4 清华大学刘英磊等的试验研究	156
6.5 《规范》建议的柱抗震加固方法	178
本章参考文献	179
第7章 抗剪加固	180
7.1 概述	180
7.2 混凝土梁的抗剪加固试验研究	181
7.3 混凝土柱的抗剪加固试验研究	187
7.4 抗剪加固计算	190
本章参考文献	210
第8章 抗弯加固	212
8.1 概述	212
8.2 抗弯加固受力性能及其承载力计算	213
8.3 FRP 剥离破坏	236
8.4 裂缝计算	256
8.5 预应力加固	262
8.6 疲劳加固	272
本章参考文献	284
第9章 砌体加固	287
9.1 概述	287
9.2 砌体墙面内破坏理论	288
9.3 FRP 加固砌体结构的主要形式	291
9.4 FRP 加固砌体试验研究及分析	292
9.5 FRP 加固砌体墙受剪承载力分析	301
9.6 FRP 加固砌体墙受剪承载力计算	308
本章参考文献	310
第10章 FRP 桥面结构	312
10.1 FRP 桥面结构的应用背景	312
10.2 FRP 桥面板的形式与分类	313
10.3 FRP 桥面结构体系的研究与开发	316
10.4 空心桥面板的变形及破坏	320
10.5 外部纤维缠绕增强 FRP 桥面板	323

本章参考文献·····	346
第 11 章 FRP 组合梁、板 ·····	351
11.1 概述·····	351
11.2 FRP-混凝土剪力连接性能的研究 ·····	354
11.3 FRP-混凝土组合梁的试验研究 ·····	371
11.4 设计计算方法·····	395
本章参考文献·····	407

第1章 绪 论

纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer/Plastic, 简称 FRP) 是由纤维材料与基体材料按一定比例混合并经过一定工艺复合形成的高性能新型材料。这种材料从 20 世纪 40 年代问世以来, 在航空、航天、船舶、汽车、化工、医学和机械等领域得到了广泛的应用。近年来, FRP 以其高强、轻质、耐腐蚀等优点, 开始在土木与建筑工程结构中得到应用, 并受到工程界的广泛关注。

复合材料由增强材料和基体构成, 根据复合材料中增强材料的形状, 可分为颗粒复合材料、层合复合材料和纤维增强复合材料等。FRP 只是复合材料中的一种。常用的 FRP 的基体为树脂、金属、碳素、陶瓷等, 纤维种类有玻璃纤维、硼纤维、碳纤维、芳纶纤维、陶瓷纤维、玄武岩纤维、聚烯烃纤维、PBO (聚对亚苯基苯并双噁唑) 纤维以及金属纤维等。目前工程结构中常用的 FRP 主要为碳纤维 (Carbon Fiber)、玻璃纤维 (Glass Fiber)、玄武岩纤维 (Basalt Fiber) 和芳纶纤维 (Aramid Fiber) 增强的树脂, 分别简称为 CFRP、GFRP、BFRP 和 AFRP。

FRP 作为结构材料出现于 1942 年, 美国军方用手糊的 GFRP 制作雷达天线罩^[1]。20 世纪 50~60 年代 FRP 才开始用于民用建筑中。1961 年, 英国 Smethwick 的一座教堂的尖顶采用了 GFRP^[2]; 1968 年, 英国的工程师用 GFRP 板和铝质骨架在利比亚港口城市班加西设计并建造了一个穹顶, 防止空气中氯盐对结构的侵蚀; 同年, 英国 Wollaston 又建成了一座全 GFRP 折板结构的仓库^[2]; 1970 年, 英国 Liverpool 建成了一座 GFRP 连续梁的人行天桥, 跨径 10m, 宽 1.5m^[3]。它们分别为文献记载中较早将 FRP 应用于建筑和桥梁结构中的实例, 这些结构都是手糊工艺制成。

我国于 1958 年就开始探索在混凝土构件中用玻璃纤维束代替钢筋^[3]。到 70~80 年代 FRP 在结构工程中的应用与研究逐渐增多。1972 年在云南建造了一个直径为 44m 的球形 GFRP 雷达天线罩^[4]; 1982 年在北京密云建成一座跨径 20.7m GFRP 蜂窝箱梁公路桥, 设计荷载等级为汽-15、挂-80, 并进行了现场荷载试验, 该桥为世界上第一座 FRP 公路桥^[4]。此后, FRP, 尤其是价格比较便宜的 GFRP (俗称玻璃钢), 在工结构程中应用的越来越多。但这些应用大多数都是附属性、临时性的构件, FRP 材料的优越性能没有得到充分发挥, 即使用 FRP 作为结构材料也多是尝试性的, 没有形成规模。同时, 多数的结构工程师不了解 FRP 材料, 大大限制了它的应用和推广。

近十年来, 尤其在美国北岭地震和日本阪神大地震后, FRP 材料 (主要是片材) 加固补强混凝土结构技术在工程中得到了很好的应用。随着这项技术在世界各地的推广和发展, FRP 材料的轻质高强、耐腐蚀、施工性能好等优越性能被工程界逐渐认可, 开始以各种形式应用于各类土木与建筑结构工程中。目前, FRP 材料在工程结构中的应用和研究十分活跃, 已逐渐形成一个新的热点。本书对 FRP 材料在土木与建筑结构工程中应用与研究情况进行介绍, 并探讨今后可能的发展趋势, 以期促进 FRP 材料在我国土木与建

筑结构工程领域应用和研究工作的开展。

目前国外发达国家的工程领域对 FRP 材料的开发和应用十分重视,开展了大量研究,组织过近百次各类国际学术交流会议,成为一个非常活跃的研究领域,并且在实际应用方面也已有很多的实例,一些国家也已制定了各种应用的相应规范和技术标准。尽管 FRP 材料不能大面积代替传统钢材和混凝土材料,但作为一种高性能材料,它必将成为传统结构材料的必要补充,使得以往工程中难以解决的一些问题迎刃而解,给土木与建筑工程带来新的发展契机,并将显示不可忽视的综合经济效益。我国近年来在该领域的研究和应用工作发展迅速,但主要以结构加固为主,其他方面的工作相对较为滞后。希望通过本书,使结构工程师们对 FRP 材料及其应用有更多的认识,促进我国 FRP 的研究和应用,提升我国土木和建筑结构的水平。

1.1 FRP 材料的特点

FRP 材料的性能与传统结构材料有很大差别,了解和掌握 FRP 材料的优缺点,才能在工程结构应用中充分发挥它的优势,避免其不足。

FRP 具有以下优点:

(1) 有很高的比强度,即通常所说的轻质高强,因此采用 FRP 材料可减轻结构自重。在桥梁工程中,使用 FRP 结构或 FRP 组合结构作为上部结构可使桥梁的极限跨度大大增加。理论上,用传统结构材料桥梁的极限跨度在 5000m 以内,而上部结构使用 FRP 结构可达 8000m 以上^[7],有学者已经对主跨长达 5000m 的 FRP 悬索桥进行了方案设计和结构分析^[8]。在建筑工程中,采用 FRP 材料的大跨空间结构体系的理论极限跨度要比传统材料结构大 2~3 倍,因此,FRP 结构和 FRP 组合结构是获得超大跨度的重要途径。本书作者提出的“FRP 编织网大跨结构体系”就是一种利用其轻质高强性能的新型结构形式^[9]。在抗震结构中,FRP 材料的应用可以减轻结构自重,减小地震作用。另外,FRP 材料的应用也能使结构的耐疲劳性能显著提高。

(2) 有良好耐腐蚀性,FRP 可以在酸、碱、氯盐和潮湿的环境中长期使用,这是传统结构材料难以比拟的。在美国每年因钢材腐蚀造成的工程结构损失高达 700 亿美元,近 1/6 的桥梁因钢筋锈蚀而严重损坏;加拿大用于修复因老化损坏的工程结构的费用达 490 亿加元;我国目前因钢材锈蚀而造成的损失也在逐年增加^[10]。而在化工建筑、盐渍地区的地下工程、海洋工程和水下工程中,FRP 材料耐腐蚀的优点已经得到实际工程的证明。一些发达国家已经开始在寒冷地区和近海地区的桥梁、建筑中较大规模地采用 FRP 结构或 FRP 配筋混凝土结构以抵抗除冰盐和空气中盐分的腐蚀,极大地降低了结构的维护费用,延长了结构的使用寿命。

(3) 具有很好的可设计性。FRP 属于人工材料,可以通过使用不同的纤维材料、纤维含量和铺陈方向设计出各种强度指标、弹性模量以及特殊性能要求的 FRP 产品。而且 FRP 产品成型方便,形状可灵活设计。

(4) 具有很好的弹性性能,应力应变曲线接近线弹性,在发生较大变形后还能恢复原状,塑性变形小,有利于结构偶然超载后的变形恢复。

(5) FRP 产品适合于在工厂生产、运送到工地、现场安装的工业化施工过程,有利

于保证工程质量、提高劳动效率和建筑工业化。

(6) 其他优势, 包括透电磁波、绝缘、隔热、热胀系数小等, 使得 FRP 在一些特殊场合能够发挥难以取代的作用, 如雷达设施、地磁观测站、医疗核磁共振设备结构。

与传统结构材料不同, FRP 制品通常为各向异性, 沿纤维方向的强度和弹性模量较高, 而垂直纤维方向的强度和弹性模量很低。由于 FRP 的各向异性, 在受力性能上还有许多不同于传统结构材料的现象, 如拉伸翘曲现象, 这些都会增加 FRP 结构的分析与设计难度。

与钢材相比, 大部分 FRP 产品的弹性模量较低, 大致与混凝土和木材在同一数量级。因此, 在 FRP 结构的设计通常由变形控制。可通过设计 FRP 构件的截面、合理地与混凝土等材料组合以及采用预应力等方法控制结构的变形, 补偿刚度的不足。

FRP 材料的剪切强度、层间拉伸强度和层间剪切强度仅为其抗拉强度的 5%~20%, 而金属的剪切强度约为其拉伸强度的 50%。这使得 FRP 构件的连接成为突出的问题。FRP 结构可采用铆接、栓接和粘接, 但不管哪种连接方式, 连接部位往往都容易成为整个构件的薄弱环节。因此在 FRP 结构设计中, 一方面要尽量减少连接, 另一方面要重视连接的设计。

与混凝土相比较, 一般的 FRP 材料的防火性能较差, 主要是由于多数树脂在高温下会软化, 在树脂达到软化温度时 (通常为 70℃ 左右) 力学性能会大大降低, 达到玻璃化温度 (通常为 300℃ 左右) 时性态就会发生转变。但在 FRP 的树脂材料中可掺入阻燃剂, 提高其抗火性能。目前掺入阻燃剂的环氧树脂复合成的 CFRP, 表面再进行防火处理, 其效果已经可以与混凝土结构相媲美了。

一些研究已经表明 FRP 材料本身的抗疲劳性能优于传统结构材料^[5,6,11]。但值得重视的是, 初始缺陷和工作环境对 FRP 材料抗疲劳性能的影响非常显著。因此实际工程中的 FRP 结构整体的抗疲劳性能还需要进行深入的研究。

FRP 材料的长期性能和耐久性是很多工程师和使用者所十分关心的问题^[12-14]。目前许多 FRP 产品供应商都通过快速老化试验来证明其产品的寿命在 35 年以上, 甚至达到 70 年。但是 FRP 材料诞生也不过 60 多年, 应用于土木工程中也仅 40 余年。还应注意的是, 耐久性不仅仅是材料老化, 还包括温度和湿度变化的影响、FRP 的蠕变和应力松弛以及 GFRP 与混凝土碱性反应等问题, 而且在实际环境下这些因素是共同作用、相互影响的。文献 [2] 的调研以及我国的应用实例中, 有 FRP 结构因耐久性而失效的例子, 也有应用 20 年以上的工程实例。因此对 FRP 结构的耐久性还需要进行更为深入和广泛的研究。

经济性也是所有工程师和使用者都很关心的问题。仅从材料价格上看, FRP 结构和 FRP 组合结构与钢筋混凝土结构相比没有竞争力, 但由于自重轻, 并考虑到 FRP 材料耐腐蚀所带来的低廉的维护费用, 采用 FRP 材料的综合经济效益是值得重视的。1986 年建成的重庆交院桥, 采用 GFRP 箱梁, 建造成本比钢桥省了 50%^[7]。以美国的短跨桥梁为例, FRP 结构的日常维护费用仅为钢筋混凝土结构的 1/5, 改造维修费用仅为钢筋混凝土结构的 1/2^[15]。另外, 由于 FRP 目前在工程结构中还处于初期应用阶段, 初期费用是偏高的, 随着应用量增大, FRP 产品生产规模扩大, 其成本势必大大降低。以我国 CFRP 布加固混凝土结构为例, 其价格从初期 2000 元/m² 降低到目前 300~500 元/m², 就是一

个很好的例证。

1.2 FRP 在工程结构加固补强中的应用

将 FRP 片材粘贴在构件表面受拉,可以增强构件的受力性能。早在 20 世纪 80 年代,这项技术在我国工程实践中就曾尝试过:云南海孟公路巍山河桥的加固中采用了外贴 GFRP 内夹高强钢丝的方法,此后湖南溆浦大江口桥、上海宝山飞云桥、广东官汕线郭屋楼桥、韶关地区风村桥以及南京长江大桥引桥等,都采用环氧树脂粘贴玻璃布进行了加固^[16],但这项技术在我国的发展缓慢。而在 20 世纪 80 年代,瑞士联邦实验室的 Meier 等人对 FRP 板代替钢板加固混凝土结构的技术进行了系统的研究,并在 1991 年用 CFRP 板成功的加固了瑞士的 Ibach 桥^[17]。此后,FRP 片材加固混凝土结构技术的研究在欧洲、日本、美国和加拿大等国得到迅速发展,并在实际工程得到较多的应用,特别是美国北岭地震和日本阪神地震后,FRP 加固技术的优越性在已损坏结构的快速修复加固中得到了很好的验证^[12]。目前,这些国家和地区先后颁布或出版了 FRP 加固混凝土结构设计规程或指南^[18-21]。我国从 1997 年才开始对 FRP 加固技术开展系统的研究,使这一技术得到推广,在一些重大工程,如人民大会堂、民族文化宫的加固改造中得到了应用。2000 年完成了我国首部 FRP 片材加固设计与施工技术规程^[22]。近年我国还开展了 FRP 片材加固砌体结构和钢结构的研究和应用,但仍以加固混凝土结构的研究和应用最多。

关于 FRP 片材加固混凝土结构,最近国内已有大量的研究论文发表,本书不再赘述,则主要针对不同的加固形式,指出其应用中应注意的关键问题:

(1) FRP 布缠绕加固混凝土柱,通过约束混凝土提高混凝土强度和变形能力,并可提高柱的抗剪能力^[23,24]。这是 FRP 布加固混凝土最有效的加固形式,其加固效果已得到国内外大量试验的验证,而且各种 FRP 片材均有效。但研究表明,FRP 对混凝土柱的约束效果与截面形状有很大关系,对于矩形截面柱一般只能提高变形能力和抗剪能力,而对受压承载力的提高有限,正常加固量下一般不超过 25%^[25]。但如果将截面形状适当处理成有一定弧度,则可显著提高受压承载力。在我国工程应用中,往往十分关心加固后柱的轴压比限值能否提高,这与约束混凝土柱的受压承载力和变形能力的提高有很大关系,从目前的研究来看,FRP 包裹缠绕圆形混凝土可以大大改善其延性,可适当放松轴压比限制^[26]。另一个值得注意的是,虽然 CFRP 布的强度是各种 FRP 中最高的,但其延伸率较小,其约束混凝土最终表现为突然的脆性破坏。近年来已有采用混合 FRP 约束混凝土的研究^[27],还有一些高延伸率纤维材料的应用,可使脆性破坏得到改善,且能改善约束效果。

(2) 在梁、板受拉面粘贴 FRP 片材,能提高构件受弯承载力,并可使裂缝得到有效控制。这种加固形式在国内应用较多,但从加固效果来看存在以下一些问题:①FRP 片材的受拉作用只是在受拉钢筋屈服以后才能得到有效发挥,而此时梁和板的挠度变形一般已很大,因此 FRP 片材用于受弯加固通常只能作为一种安全储备;②加固后受弯承载力提高程度与加固前梁板的原有配筋量有很大关系,且 FRP 的强度一般不能得到充分利用^[28];③FRP 片材用于受弯加固时易产生剥离破坏,应充分注意采取抗剥离的构造措施。为了提高受弯加固效果,采用预应力方法可以获得较好的效果,我国已成功开发出预应力

CFRP 布张拉设备和加固技术^[29]。FRP 加固可有效控制裂缝的开展,尤其在梁的侧面粘贴 FRP 条带,可控制梁腹配筋不足导致裂缝过大的情况。相对于受弯承载力加固,这应该成为 FRP 在梁板加固中的主要应用方式,但目前关于加固后的裂缝计算问题尚未有深入研究。

(3) 对梁、柱构件采用 FRP 片材包裹或 U 形箍包裹,以提高其受剪承载力。这种加固形式也较为有效,不过同样需注意其提高程度与原构件配箍率有关,且 FRP 片材强度的发挥一般只有 20%~40%。此外,对于 U 形或侧面粘贴加固,剥离破坏仍是主要破坏形式,因此,FRP 与混凝土界面间的剥离是非常值得深入研究的问题^[30]。

除以上三种主要加固形式外,FRP 布也可用于受扭和剪力墙的加固。对于柱的受弯加固梁柱节点因 FRP 的锚固问题难以解决,而很难得到实际应用。

目前虽然 FRP 片材加固混凝土结构已得到广泛应用,但仍有许多问题值得深入研究,主要有:界面粘结性能和剥离、疲劳性能、二次受力、防火问题、耐久性以及环境影响等。对于隧道、涵洞、烟囱、壳体结构等特种结构的加固,粘贴 FRP 片材有很大优势,研究工作在我国已有开展^[31],但还较少。

FRP 片材的截面积较小,使得加固效果受到影响,因此近年来采用 FRP 网格材加固^[32]、FRP 筋表面嵌入式加固技术^[33]以及 FRP 索体外预应力加固在国内外有较多的研究和应用。

除了用于混凝土结构加固外,FRP 也可用于砌体结构、木结构和钢结构的加固,这方面的研究和应用工作目前国内也有开展。

FRP 对于钢结构的加固包括无初始缺陷和有初始缺陷钢梁的加固。加固的效果主要体现在疲劳寿命、极限承载力、屈曲荷载和耐腐蚀性能的提高,试验表明,疲劳性能的提高非常显著^[34]。在西方国家用 FRP 加固铸铁结构应用也较多。总体上,我国对 FRP 加固钢结构的研究还处于起步阶段,仍需进行深入的研究。

另一个值得注意的问题是,FRP 材料直到破坏都基本表现为线弹性,这与传统的钢材和混凝土的力学性能有很大差别,因此采用这种材料加固或直接作为构件和组合构件,其极限状态、设计方法和可靠度问题,以及设计指标都与目前常用的混凝土结构和钢结构有所不同^[35,36]。

1.3 FRP 筋和预应力 FRP 筋混凝土结构

FRP 筋中纤维体积含量可达到 60%,具有轻质高强的优点,重量约为普通钢筋的 1/5,强度为普通钢筋的 6 倍,且具有抗腐蚀、低松弛、非磁性、抗疲劳等优点。目前用 FRP 筋代替钢筋可利用其良好的耐腐蚀性,避免锈蚀对结构所带来的损害,减少结构维护费用;还较多地应用于有无铁磁性要求的特殊工程中;在桥梁工程中,FRP 索还可用作悬索桥的吊索及斜拉桥的斜拉索,以及预应力混凝土桥中的预应力筋。作为混凝土构件中配筋的 FRP 筋要通过表面砂化、压痕、滚花或编织等工艺以增强其与混凝土间的粘结力;用作预应力 FRP 索一般较柔软,具有一定的韧性。

在北美、北欧等西方国家,由于冬季的除冰盐对桥梁结构中钢筋腐蚀所带来的严重危害已成为困扰基础设施工程的主要问题,FRP 配筋和 FRP 预应力筋混凝土结构的研究和

应用发展较早且较快。20 世纪 70 年代末 FRP 筋开发成功,并应用于工程中;80 年代末,德国、日本相继建成 FRP 预应力混凝土桥^[16]。目前已有多种 FRP 筋、索和网格材产品^[35]以及配套的锚具,并编制了相关的规范和规程^[37-41],在桥梁结构和建筑结构中都得到了较多的应用。图 1.3-1 为国外工程中应用的实例。

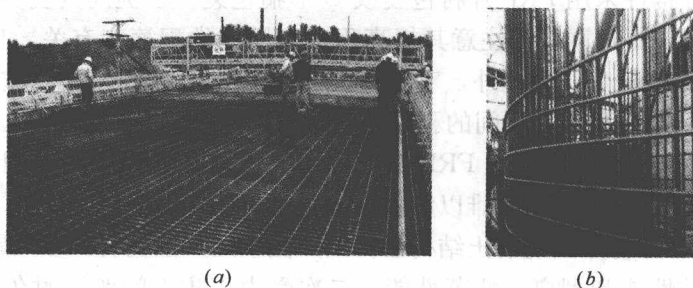


图 1.3-1 FRP 配筋混凝土在桥梁和建筑中的应用

(a) 桥板^[37]; (b) 墙

我国这方面的研究还刚开始,已初步研制出 FRP 筋产品和预应力锚夹具。在 FRP 筋混凝土方面,针对 FRP 筋与混凝土之间的粘结试验方法,混凝土强度、FRP 筋的埋长和直径、FRP 筋外部约束和表面变形以及混凝土保护层厚度等因素对 FRP 筋与混凝土间粘结性能的影响进行了初步研究,以及 FRP 筋和预应力 FRP 筋混凝土构件受力性能的试验研究^[42]。

FRP 筋及预应力 FRP 筋的另外一个应用对象是岩土工程,它已用于加筋土中。GFRP 因其具有价格低廉、方便安装和耐久性强等特点,已被广泛应用于潮汐变化干湿交替的挡土墙、地基锚杆及喷射混凝土筋等工程。

FRP 筋直到拉断均表现为线弹性,没有普通钢筋那样的屈服平台,构件的破坏带有一定的脆性,因此 FRP 筋不能简单地当成钢筋进行计算,必须针对其性能采用合理的设计方法。此外,FRP 筋无法现场成形,因此像箍筋等形状较为复杂的配筋,需事先设计好后由工厂加工。

1.4 FRP 结构及 FRP 组合结构

FRP 结构是指用 FRP 制成各种基本受力构件所形成的结构;FRP 组合结构则是指将 FRP 与传统结构材料,主要是混凝土和钢材,通过受力形式上的组合,共同工作来承受荷载的结构形式。

FRP 与混凝土通过合理的组合方式使 FRP 型材与混凝土共同受力,发挥各自的优势,达到提高受力性能、降低造价、增强耐久性、便于施工的目的。FRP 与钢材组合,可发挥出钢材的高弹性模量和 FRP 耐腐蚀、耐疲劳性能好的优势,达到互补的效果。可在拉挤 FRP 型材时,直接将钢筋和钢丝嵌入型材中成型;也可在钢结构外部采用 FRP 型材封闭,一方面防止钢结构锈蚀,另一方面可与钢结构共同受力。还可用钢结构骨架与 FRP 织物蒙皮结合组成蒙皮结构。

1.4.1 FRP 拉挤型材结构

FRP 拉挤型材单向受力性能好, 可以做成工形、槽形、箱形等型材, 组成 FRP 框架或桁架结构。但 FRP 构件之间主要采用螺栓连接和粘接, 有时配合榫接。图 1.4-1 (a) 为 1999 年在瑞士 Basel 建造的一座 FRP 框架结构的建筑^[44], 图 1.4-1 (b) 为一个强腐蚀性环境车间的 FRP 桁架屋盖。

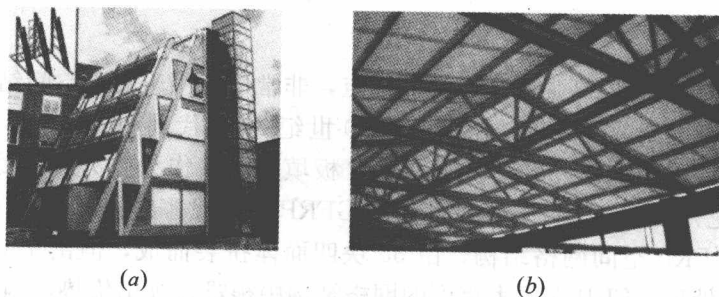


图 1.4-1 FRP 结构
(a) 框架结构^[42]; (b) 桁架屋盖

另外, 还可以直接将拉挤 FRP 空心板或带肋板作为楼板使用。研究表明^[44], FRP 空心板能够承受较大的荷载, 并且自重仅为混凝土楼板的 10%~20%, 具有明显的优势。

1.4.2 FRP-混凝土组合结构

FRP-混凝土组合梁、板是一种合理的 FRP 与混凝土组合的结构形式, 其设计概念与钢-混凝土组合梁、板相同: 上部为混凝土主要受压, 下部为 FRP 构件主要受拉, 它们之间通过剪力连接件使两者协同工作, 使 FRP 得到充分利用, 并获得较大的刚度; 同时, FRP 构件可兼为模板, 便于施工。FRP 组合梁、板的研究在各国都有开展^[45-49], FRP 型材的形式和种类多样, 剪力传递的方式也多样, 包括: 接触摩擦、粘接、螺栓、特制剪力件等。但这种结构形式目前在实际工程中的应用却并不多。我国的密云 FRP 桥经过改造后成为 FRP-混凝土组合箱梁桥, 见图 1.4-2, 该工程的实践表明, 组合构件比单纯的 FRP 构件的刚度大, 同时可避免一些局部破坏的发生。2002 年, 澳大利亚建成了一座跨度为 10m 的 FRP-混凝土组合梁桥^[50], 静载和疲劳试验以及现场实测的结果都表明这种结构具有很好的承载能力。

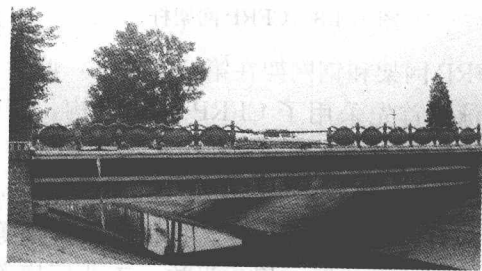


图 1.4-2 世界上第一座 FRP
公路桥 (北京密云) (2005 年摄)

将混凝土浇入预制的 FRP 管中形成的 FRP 管混凝土组合构件, FRP 管对内部混凝土起约束作用, 并兼作模板, 可以极大地提高混凝土的强度和变形能力, 同时混凝土也可防止 FRP 管的屈曲破坏。FRP 管可采用拉挤、缠绕、RTM、手糊等多种方法制成。FRP

管混凝土受力性能好, 施工方便, 并具有很好的耐腐蚀性, 优势非常明显, 因此在结构工程中得到较广泛的应用。世界各国学者对于 FRP 管混凝土的研究进行得比较深入, 对于 FRP 管约束混凝土的基本受力性能 (包括压、弯、剪、抗震及其组合)、施工过程中 FRP 管的受力性能、长期工作状态下 FRP 管混凝土的受力性能以及 FRP 管中纤维种类和缠绕角度都有研究^[51-58]。还有一些学者对 FRP 管混凝土的构造进行了改进, 提高构件性能, 如: 在 FRP 管内设置 FRP 肋, FRP 管中心放置泡沫塑料圆柱形成环形截面等。

1.4.3 FRP 空间结构

由于 FRP 材料的轻质高强和耐腐蚀的优点, 非常适合用于大跨空间结构。用 FRP 制成杆件, 可应用于网架或网壳等结构中。从 20 世纪 70 年代到 80 年代初, 英国建造了几处网架结构, 杆件采用钢或混凝土, 用 GFRP 板填充网格作为受力或半受力构件^[59], 如伦敦的 Covent 花卉市场; 其间, 尝试性地用 GFRP 杆件代替部分钢构件。1974 年, 在伦敦建造了一座全 FRP 空间网格结构, 由 35 块四面体拼装而成, 但由于 GFRP 弹性模量低, 并且节点难处理, FRP 在更大跨度的网格结构中很难发挥出优势, 因此发展缓慢。

近年, 日本开发成功了带有铝合金接头 CFRP 卷管, 应用于空间网架结构中。CFRP

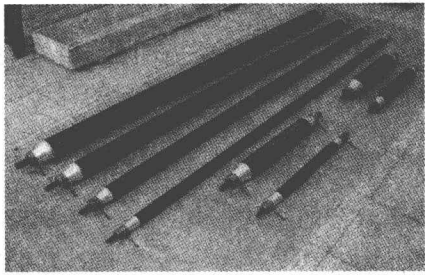


图 1.4-3 CFRP 网架杆

网架的杆件由 CFRP 片材以不同的角度层叠粘贴而成, 杆端有铝合金的锥头与球节点连接。CFRP 网架结构重量轻, 仅为钢网架的 $1/5 \sim 1/4$, 施工强度小、周期短, 耐腐蚀性好, 可避免凝露, 维护费用低, 线胀系数小, 大跨度温度效应小。因此它非常适合在超大跨度的空间结构和环境比较恶劣的大跨结构中应用, 如: 体育馆、游泳馆、大型温室、展览馆等等。CFRP 网架的价格是钢网架的 2 倍, 而维护费用是钢网架的 $1/5$ 。根据经济性分析,

CFRP 网架和钢网架在第 8 年持平, 此后 CFRP 网架的费用就少于钢网架。日本三岛市民游泳馆首先采用了 CFRP 网架结构, 获得了很好的效果。图 1.4-3 为我国台湾生产的 CFRP 网架杆件。

FRP 还可制成波纹板、带肋板、空心板或夹心板, 组成各种形状的拱、壳、折板以及穹顶等空间结构, 可用于雷达天线罩、娱乐设施、工业厂房等结构中, 具有色泽鲜亮、耐腐蚀、成形容易、施工方便、重量轻、保温性好等优势, 如果表面覆盖 CFRP, 还可使结构耐久性和力学性能得到极大的改善。图 1.4-4 所示的 FRP 夹层屋面体系就是一种典型形式。1968 年英国 Wollaston 建造了一个仓库采用了 GFRP 折板结构; 1972 年我国建造的 44m 直径的球形雷达天线罩为 GFRP 夹心板拼装穹顶, 这些结构至今仍在正常使用。上海东方明珠电视塔的首层大堂采用了 60m 跨的 FRP 双曲屋盖, 获得了很好的建筑效果和使用效果。

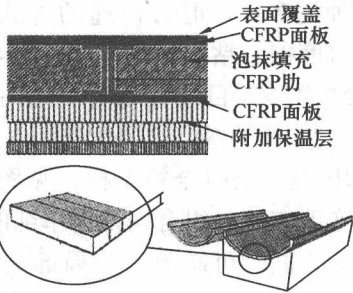


图 1.4-4 FRP 夹心板屋面

本书作者提出的 FRP 编织网结构体系也是一种新型的 FRP 大跨空间结构体系^[60]。

它采用 FRP 薄板条,按类似编竹席的交错编织方法形成编织网面;网面边缘锚固于环梁上,并采用支撑和网面外拉索的方法,使整个 FRP 编织网张紧使其具备足够的几何刚度,形成超大跨度的屋面体系。FRP 在结构中主要受拉力作用,充分利用了 FRP 材料的抗拉强度;并采用了编织方式增强结构的整体性;且利用编织交点的相互摩擦作用增大结构的阻尼,是一种高效的结构体系。此外,FRP 板条的编织排布可以获得特殊的建筑效果,且维护费用低。图 1.4-5 为一座采用 FRP 编织结构体系的大型体育场的模型图。

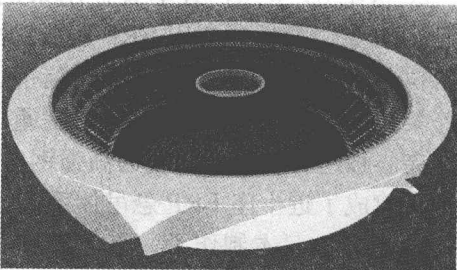


图 1.4-5 FRP 编织网结构

FRP-铝合金组合结构是另一个值得注意发展的新型结构形式,它兼有两种材料轻质的特点,同时 FRP 又极大地增强了铝合金构件的刚度和承载力。这种组合结构已在航空航天工程中得到广泛应用,我国也已开始在土木与建筑工程结构方面的研究。

1.4.4 桥梁工程中的 FRP 结构与 FRP 组合结构

因为 FRP 的比强度和比模量高,所以桥梁工程师们认为 FRP 是获得超大跨度桥梁的结构材料。从 20 世纪 70 年代开始,就在桥梁工程中尝试应用 FRP 材料,并相继建成了一批 FRP 桥梁(见表 1.4-1),主要以人行桥为主,目的是验证 FRP 材料用于桥梁结构的可能性和有效性。

早期的 FRP 桥梁 (1985 年以前) 表 1.4-1

年代	地点	简介
1970	英国,利物浦	GFRP 连续梁人行桥,跨径 10m、宽 1.5m
1972	以色列,特拉维夫	GFRP 简支梁人行桥,跨径 24m、宽 1.8m
1976	美国,弗吉尼亚	GFRP 简支桁架人行桥,跨径 4.9m、宽 2.1m
1982	中国,北京密云	GFRP 蜂窝箱梁公路桥,跨径 20.7m、宽 9.2m
1983	保加利亚,索菲亚	GFRP 简支梁公路桥,跨径 12m、宽 8m
1983	美国	简支桁架公路桥,跨径 32.3m, CFRP+GFRP
1983	美国,阿肯色州	GFRP 简支梁人行桥,跨径 12.2m、宽 0.9m
1983	美国	GFRP 简支梁人行桥,跨径 21.3m

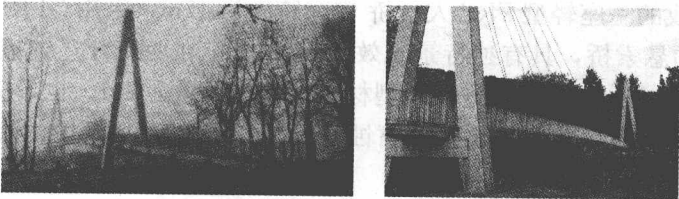


图 1.4-6 全 FRP 斜拉桥 (英国)

20 世纪 80 年代, 有学者提出采用高强轻质的复合材料建造直布罗陀 FRP 跨海大桥^[61], 开始尝试性地应用 FRP 建造斜拉和悬吊结构体系。1986 年, 我国重庆建成了第一座斜拉 FRP 箱梁人行天桥——交院桥。该桥为单塔单索面非对称斜拉体系, 全长 50m, 主跨梁长 27.4m, 宽 4.4m, 箱梁自重 8.9t (为钢梁的 30%, 混凝土梁的 13%), GFRP 蜂窝夹心板组合箱梁, 斜缆为高强钢丝束, 其他部分为混凝土结构。此后, 在四川、重庆等地又建成了近十座 FRP 悬吊体系人行桥^[45]。

1990 年, 日本制作了一座全 FRP 的双塔双索面斜拉体系的试验桥, 用来验证全 FRP 斜拉桥的可行性和耐久性, 通过荷载试验和长期变形观测验证了全 FRP 结构桥梁的可行性。1992 年, 英国苏格兰的 Aberfeldy 建成了一座全 FRP 结构的斜拉人行天桥, 全长 113m, 主跨为 63m, 宽 2.2m, 双塔双索面斜拉体系, A 形桥塔, 如图 1.4-6 所示。桥塔、梁、桥面板和扶手都采用了箱形截面的 GFRP 拉挤型材, 斜拉索为 AFRP 索, 外裹聚乙烯保护, 部分连接为金属连接。总造价为 20 万美元, 为传统木桥、混凝土桥、钢斜拉桥或钢桁架桥费用的一半, 而且至少 20 年免维修, 这座桥的成功大大推动了 FRP 大跨桥梁的研究。1996 年, 在瑞士建成的 Stork 斜拉桥中采用了 2 根拉挤的 CFRP 筋集束成的索 (共 24 根索), 其余为高强钢绞线, 这是第一座采用 FRP 桥索的公路桥梁。这些尝试和工程应用为 FRP 大跨度桥梁的研究和应用起到了很好的示范作用, 但迄今还没有一座真正的大跨度 FRP 公路桥梁。2002 年, 日本的 Maeda 等人提出了用 FRP 建造 5000m 跨度的悬索桥的方案^[8], 桥塔、桥索和桥梁都采用了 FRP, 并进行了静力和动力的分析。这个方案的提出为 FRP 大跨桥梁的应用展现了光明的前景。

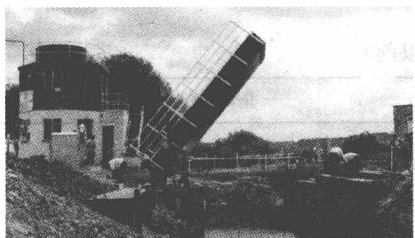


图 1.4-7 FRP 可开启桥 (英国)

在尝试用 FRP 建造大跨度桥梁的同时, FRP 制成的中小跨度的轻质桥梁因其施工非常快捷、造型美观、色彩鲜艳、耐腐蚀等优势, 在实际应用中获得了很好的效果。FRP 轻质桥的结构形式可根据实际需要进行设计和加工, 其中桁架结构和梁板结构居多。1994 年, 在英国就用 GFRP 拉挤型材组合成了一座可以通过 40t 卡车的可开启桥——Bond Mill 桥, 桥长 8.22m, 4.27m 宽, 由 6 根 FRP 箱形梁组成, 当通过船时, 以一岸为轴, 另一边翘起, 如图 1.4-7 所示。1997 年, 瑞士 Pontresina 的风景区内建成了一座跨河的全 GFRP 的人行桥, 为双跨连续桁架, 跨度 12.5m, 宽 1.5m, 采用 GFRP 拉挤型材粘接而成。它非常轻, 很容易安装拆卸, 在旅游的旺季安装使用, 淡季收起来, 非常方便。由于 FRP 可着色, 可设计性强, 可以制成具有丰富色彩和形式新颖的结构, 形成具有独特景观特色的轻型桥梁。例如图 1.4-8 所示的桥梁, 为 2001 年在英国建成的一座轻型 FRP 人行桥^[63], 跨度为 47m, 采用 GFRP 制成箱梁, 用不锈钢吊索张拉成的悬索桥, 具有独特景观效果。2001 年在西班牙还建成了的一座全 FRP 拱桥^[64], 跨度为 38m, 全部采用 GFRP 型材, 结构总重量为 19t, 也形成了独特的景观效果。此外, FRP 轻质桥梁在工业建筑、腐蚀性环境以及军事舟桥中的应用也很多, 结构形式主要以桁架为主。

用 FRP 型材构成封闭的外壳, 将桥面以下原本暴露的结构围护起来, 同时作为维护检查的通道, 还可以起到以下三个方面的效果: (1) 改变桥梁断面的形状, 减少风荷载,