



沈阳市优秀自然
科学著作资助项目

GFRP管及钢管型钢混凝土结构

Steel Reinforced Concrete-Filled Glass Fiber Reinforced
Polymer or Steel Tubular Structures

王连广 陈百玲 著



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

GFRP管及钢管型钢混凝土结构

王连广 陈百玲 著



TU375
47

辽宁科学技术出版社

沈阳



北航

C1725488

内容提要

本书介绍了FRP材料特性、GFRP管混凝土结构特点、GFRP管型钢混凝土和钢管型钢混凝土结构的分类,以及FRP管约束混凝土本构关系和工作机理等。专门研究了GFRP管混凝土轴心受压构件、拼接GFRP管混凝土构件、拼接GFRP管钢筋混凝土构件、GFRP管型钢混凝土构件、GFRP管劲性钢筋混凝土构件、圆钢管型钢混凝土构件及方钢管型钢混凝土构件的受力性能。

本书可供土木工程、水利工程、海洋结构工程等专业的教师、研究生、高年级本科生,以及从事该领域的研究和设计人员参考。

沈阳市优秀自然科学著作资助项目

© 2013 王连广 陈百玲

图书在版编目(CIP)数据

GFRP管及钢管型钢混凝土结构/王连广,陈百玲
著. —沈阳:辽宁科学技术出版社,2013.8

ISBN 978-7-5381-8168-5

I. ①G… II. ①王… ②陈… III. ①钢管混凝土
结构 IV. ①TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第164082号

出版发行:辽宁科学技术出版社

(地址:沈阳市和平区十一纬路29号 邮编:110003)

印刷者:沈阳新华印刷厂

经销者:各地新华书店

幅面尺寸:185mm×260mm

印 张:21

字 数:460千字

印 数:1~2000

出版时间:2013年8月第1版

印刷时间:2013年8月第1次印刷

责任编辑:李伟民 韩延本

封面设计:嵘 嵘 解 龙

版式设计:曲师成

责任校对:栗 勇

书 号:ISBN 978-7-5381-8168-5

定 价:60.00元

联系电话:024-23284360

邮购热线:024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

随着土木建筑业的发展,建筑物承重结构承担的荷载越来越大,这就要求在重载条件下,承重结构构件要有足够的承载能力、刚度和良好的抗震延性。目前,常用的混凝土结构、钢结构等在某些特殊结构中或者不适应,或者满足不了其使用要求,为此,人们提出了将型钢与混凝土组合起来,形成了钢与混凝土组合结构,这种结构以其具有承载力高、刚度大、自重轻、节约材料及抗震性能好等优点在大跨度结构和超高层建筑中得到了应用。近几年,一种轻质高强、耐腐蚀性能极好的纤维增强复合材料FRP(Fiber Reinforced Polymer)已经进入建筑市场,成为土木工程中的一种新型结构材料,其应用和研究已经成为国内外土木工程界的热点。FRP材料主要有碳纤维复合材料CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)、玻璃纤维复合材料GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)和芳纶纤维复合材料AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer)等。最近几年,FRP管材及在其内部灌入混凝土而形成的FRP管混凝土结构也相继在土木工程中得到应用,并引起研究者的极大兴趣。有的研究人员提出将FRP管、钢管、型钢及混凝土进行组合,形成一种新型组合结构,这种结构能使材料性能得到更充分的利用,取得更大的经济与社会效益。作者将近几年完成的GFRP管混凝土构件、拼接GFRP管混凝土构件、GFRP管型钢混凝土构件、GFRP管劲性钢筋混凝土构件及钢管型钢混凝土构件的部分研究成果作以总结,汇成此书。

本书除介绍作者课题组完成的研究工作外,还介绍了国内外其他学者的部分研究成果,目的是使读者对该研究领域有一个更全面的了解。全书共分8部分。包括:(1)绪论。介绍FRP材料特性、FRP管混凝土结构特点,以及FRP管型钢混凝土和钢管型钢混凝土结构的构成。(2)GFRP管混凝土轴心受压构件。通过试验,分析了GFRP管混凝土轴心受压构件的工作机理和破坏模式,研究了GFRP管纤维缠绕角度、管壁厚度及混凝土强度等参数对轴心受压构件力学性能的影响,总结了FRP约束混凝土的本构关系和工作机理,提出了轴压构件的承载力计算公式,编制了轴心受压构件的非线性分析程序,计算分析了主要设计参数对其力学性能的影响。(3)拼接GFRP管混凝土构件。根据GFRP管混凝土构件的结构特点,设计了钢筋连接件、钢管连接件及钢板钢筋连接件,制作了基于不同连接件的GFRP管混凝土拼接构件,通过试验,研究了拼接构件的轴心受压、抗弯工作机理和破坏模式,探讨了不同连接方式对拼接构件的轴心受压、抗弯及变形等力学性能的影响,并给出了拼接构件的轴心受压和抗弯承载力计算公式。(4)拼接GFRP管钢筋混凝土构件。根据GFRP管钢筋混凝土构件的结构特点,设计了钢筋连接件、钢管连接件及钢板钢筋连接件,制作了基于不同连接件的GFRP管钢筋混

混凝土拼接构件,通过试验,研究了拼接构件的轴心受压、抗弯工作机理和破坏模式,探讨了不同连接方式对拼接构件的轴心受压、抗弯及变形等力学性能的影响,并给出了拼接构件的轴心受压和抗弯承载力计算公式。(5) GFRP管型钢混凝土构件。通过试验,研究了GFRP管型钢混凝土构件的轴心受压、偏心受压及抗弯性能的工作机理和破坏模式,分析了GFRP管纤维缠绕角度、管壁厚度等参数对构件力学性能的影响,并建立了构件的轴心受压、偏心受压及抗弯承载力计算公式,编制了偏心受压构件的非线性分析程序,计算分析了主要设计参数对其力学性能的影响。(6) GFRP管劲性钢筋混凝土构件。通过试验,研究了GFRP管劲性钢筋混凝土构件的轴心受压、偏心受压及抗弯性能的工作机理和破坏模式,分析了GFRP管纤维缠绕角度、管壁厚度及加载方式等参数对构件力学性能的影响,建立了构件轴心受压、偏心受压及抗弯承载力计算公式,编制了构件的轴心受压、偏心受压及抗弯性能非线性分析程序,计算分析主要设计参数对其力学性能的影响。(7) 圆钢管型钢混凝土构件。利用编制的圆钢管型钢混凝土轴心受压构件的计算分析程序,计算分析了套箍指标和配钢指标等主要参数对构件应力与应变关系的影响,采用统一理论和极限平衡法,建立了轴心受压构件的极限承载力计算公式;通过试验,分析了构件的偏心受压、受弯及压弯的工作机理和破坏模式,探讨了配钢指标、偏心距、长细比及加载方向等对构件力学性能的影响。建立了构件的偏心受压、受弯及压弯承载力计算公式,编制了构件相应的计算分析程序,计算分析了主要设计参数对其力学性能的影响。(8) 方钢管型钢混凝土构件。通过试验,研究了方钢管型钢混凝土构件单向偏心受压、双向偏心受压、受弯及压弯剪的工作机理和破坏模式,分析了长细比、偏心率、配钢指标及荷载作用方向等对构件力学性能的影响,建立了构件的偏心受压、双偏心受压、抗弯及压弯等承载力计算公式;编制了构件的非线性分析程序,计算分析了混凝土强度等级、套箍指标、偏心距及长细比等主要设计参数对构件力学性能的影响。

GFRP管混凝土结构、GFRP管型钢混凝土结构及钢管型钢混凝土结构是在钢管混凝土和型钢混凝土结构基础上发展起来的新型结构,很多问题尚处于研究之中,为此,一些具体问题尚需要作专题研究,结构形式尚需要更好地完善和发展。本书仅对作者完成的部分研究内容作以总结,肯定有许多问题,甚至是错误存在,敬请读者谅解并批评指正。

在课题研究过程中,得到了国家教育部、辽宁省科技厅、中铁九局集团有限公司及中央高校基本科研业务费专项资金(N120401010)的资助,在此,对他们的支持表示感谢。

本书在写作过程中引用了国内外前辈、同行的研究成果,在此表示衷心的感谢!

本书是作者和研究生共同完成的研究成果,在此,对参与课题研究的博士研究生赵同峰、刘晓、周乐、秦国鹏、刘朋、霍君华、于建军、韩华锋,硕士研究生王建森、王强稳、李令、温建萍、王瑞匣等表示感谢,感谢他们对本书做出了重要贡献。

在本书即将正式出版之际,衷心感谢曾支持与关心作者的专家、同行与朋友!

王连广 陈百玲

2013年5月

目 录

1 绪论001

1.1 FRP材料001

1.1.1 FRP材料分类001

1.1.2 FRP材料特点004

1.2 FRP管混凝土结构004

1.2.1 FRP管混凝土结构特点004

1.2.2 FRP管混凝土结构应用006

1.2.3 FRP管混凝土结构分类009

1.3 钢管型钢混凝土结构011

1.4 本书内容012

2 GFRP管混凝土轴心受压构件013

2.1 试验概况013

2.1.1 试验构件设计013

2.1.2 测量内容与方法014

2.2 试验结果分析015

2.2.1 破坏形态015

2.2.2 荷载与应变分析017

2.2.3 试验参数对比分析019

2.3 FRP管约束混凝土本构关系021

2.4 FRP管约束混凝土机理027

2.5 承载力计算028

2.5.1 极限平衡法028

2.5.2 统一理论法030

2.6 非线性全过程分析031

2.6.1 本构关系与计算模型031

2.6.2 计算结果分析032

3 拼接 GFRP管混凝土构件034

3.1 轴心受压性能034

3.1.1	试验概况	034
3.1.2	基于钢筋连接的轴心受压试验	037
3.1.3	基于钢管连接的轴心受压试验	042
3.1.4	基于钢板钢筋连接的轴心受压试验	045
3.1.5	承载力计算	050
3.2	抗弯性能	051
3.2.1	试验概况	051
3.2.2	基于钢筋连接的抗弯试验	054
3.2.3	基于钢板钢筋连接的抗弯试验	062
3.2.4	侧向变形	065
3.2.5	承载力计算	066
4	拼接GFRP管钢筋混凝土构件	069
4.1	轴心受压性能	069
4.1.1	试验概况	069
4.1.2	基于钢筋连接的轴心受压试验	071
4.1.3	基于钢管连接的轴心受压试验	076
4.1.4	基于钢板钢筋连接的轴心受压试验	079
4.1.5	承载力计算	082
4.2	抗弯性能	083
4.2.1	试验概况	083
4.2.2	基于钢筋连接的抗弯试验	085
4.2.3	基于钢板钢筋连接的抗弯试验	090
4.2.4	侧向变形	095
4.2.5	承载力计算	095
5	GFRP管型钢混凝土构件	098
5.1	轴心受压性能	098
5.1.1	试验概况	098
5.1.2	试验结果分析	101
5.1.3	承载力计算	104
5.2	偏心受压性能	107
5.2.1	试验概况	107
5.2.2	试验结果分析	109
5.2.3	承载力计算	118
5.2.4	非线性全过程分析	122

5.3 抗弯性能	125
5.3.1 试验概况	125
5.3.2 试验结果分析	128
5.3.3 承载力计算	131
6 GFRP 管劲性钢筋混凝土构件	134
6.1 轴心受压性能	134
6.1.1 试验概况	134
6.1.2 试验结果分析	136
6.1.3 承载力计算	141
6.1.4 非线性全过程分析	145
6.2 偏心受压性能	149
6.2.1 试验概况	149
6.2.2 试验结果分析	152
6.2.3 承载力计算	159
6.2.4 非线性全过程分析	166
6.3 抗弯性能	169
6.3.1 试验概况	170
6.3.2 试验结果分析	172
6.3.3 承载力计算	175
6.3.4 非线性全过程分析	179
7 圆钢管型钢混凝土构件	184
7.1 轴心受压性能	184
7.1.1 试验概况	184
7.1.2 试验结果分析	186
7.1.3 非线性全过程分析	188
7.1.4 承载力计算	191
7.2 偏心受压性能	198
7.2.1 试验概况	199
7.2.2 试验结果分析	201
7.2.3 非线性全过程分析	211
7.2.4 承载力计算	215
7.3 抗弯性能	222
7.3.1 试验概况	222
7.3.2 试验结果分析	225
7.3.3 非线性全过程分析	233

7.3.4	承载力计算	235
7.4	压弯性能	241
7.4.1	试验概况	241
7.4.2	试验结果分析	243
7.4.3	非线性全过程分析	251
7.4.4	压弯承载力相关关系	253
8	方钢管型钢混凝土构件	257
8.1	轴心受压性能	257
8.1.1	试验概况	257
8.1.2	试验结果分析	258
8.1.3	非线性全过程分析	260
8.1.4	实用承载力计算公式	263
8.2	单向偏心受压性能	264
8.2.1	试验概况	264
8.2.2	试验结果分析	267
8.2.3	承载力计算	275
8.2.4	非线性全过程分析	280
8.2.5	实用承载力计算公式	287
8.3	双偏心受压性能	289
8.3.1	试验概况	290
8.3.2	试验结果分析	292
8.3.3	非线性全过程分析	298
8.3.4	实用承载力计算公式	302
8.4	抗弯性能	303
8.4.1	承载力计算	304
8.4.2	非线性全过程分析	309
8.4.3	实用承载力计算公式	312
8.5	压弯剪性能	312
8.5.1	试验概况	313
8.5.2	试验结果分析	315
8.5.3	实用承载力计算公式	319
	参考文献	322

1 绪论

随着高（超高）层建筑、大跨度桥梁、海洋工程及地下建筑工程的发展，建筑物承重结构承担的荷载越来越大，这就要求在重载条件下，承重结构要有足够的承载能力、良好的抗震延性及抗腐蚀能力。目前，混凝土是土木建筑业应用最为广泛的建筑材料之一，在很多实际工程中出现应用高强混凝土，甚至超高强混凝土。为了改善混凝土的抗剪能力和抗震延性，通常采用适当加密箍筋的办法来约束混凝土，然而，箍筋加密给施工浇筑混凝土带来不便，为此，人们提出钢管混凝土结构和型钢混凝土结构，钢管混凝土结构在某些建筑中已经部分代替钢筋混凝土结构，钢管约束混凝土提高了混凝土承载能力和抗震延性，然而，这种结构也存在一些不利因素，在恶劣环境下使用，钢管容易锈蚀。钢材模量高、泊松比比混凝土大，在初始使用阶段，钢管对混凝土约束作用不明显，只有钢材进入弹塑性阶段后才对核心混凝土产生有效的约束作用，并且以后的约束作用增加不明显，使得钢管混凝土应用也受到一定限制。型钢混凝土结构是在钢筋混凝土内部设置型钢，提高了混凝土结构的抗剪能力和抗震延性，但是，型钢混凝土结构中的混凝土尚处于单向受力状态。随着建筑业的发展，纤维增强复合材料（Fiber Reinforced Polymer，简称FRP）已经进入建筑市场，FRP具有高强、轻质、耐腐、适用面广及便于施工等优点，已成功应用于加固修复土木建筑结构中，成为土木工程中的一种新型结构材料，其应用和研究已经成为国内外土木工程界的热点。最近几年，FRP管材，特别是在其内部灌入混凝土而形成的FRP管混凝土结构也相继在土木工程中得到应用，并引起研究者的极大兴趣。将钢管、FRP管、型钢及混凝土进行组合，形成一些新型组合构件，会更充分利用材料性能，取得更好的经济和社会效益。

1.1 FRP材料

1.1.1 FRP材料分类

纤维增强复合材料（Fiber Reinforced Polymer，简称FRP）是由多股连续纤维（如碳纤维、玻璃纤维及芳纶纤维等），以合成树脂（如聚丙烯树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等）为基体材料，并掺入适量辅助剂（如交联单体、引发剂、促进剂、蚀变剂、阻燃剂、阻聚剂、填料、颜料等），经缠绕、模压或拉挤成型技术和必要的表面处理形成的一种新型复合材料。常见的有玻璃纤维增强复合材料（Glass Fiber Reinforced Polymer，简称GFRP）、碳纤维增强复合材料（Carbon Fiber Reinforced Polymer，简称CFRP）以及

芳纶纤维增强复合材料（Aramid Fiber Reinforced Polymer，简称AFRP）三种^[1]。从根本上说，FRP的性能取决于纤维和合成树脂的类型，当然，纤维的含量、截面形状、尺寸效应和制造技术也有重要的影响。另外，不同成分组成的FRP，其物理性能可能差别很大。FRP材料及钢材的应力与应变关系曲线对比^[2]，见图1-1。

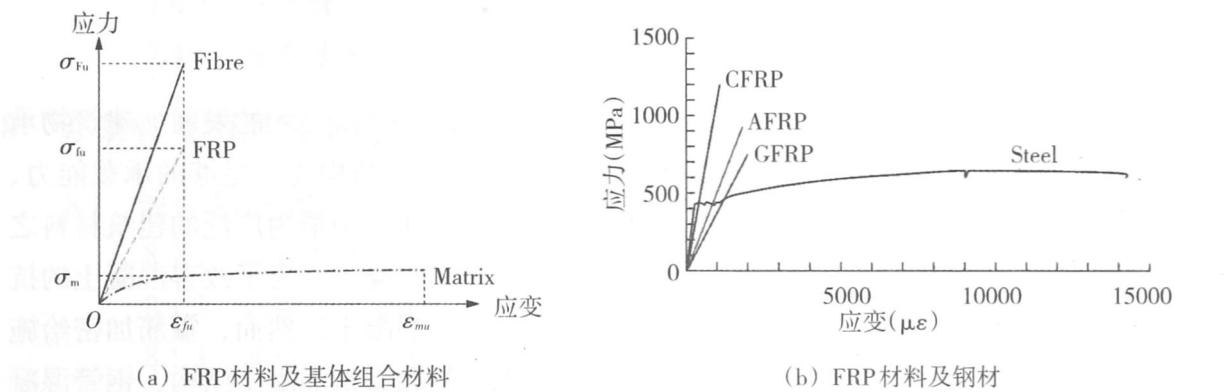


图1-1 FRP材料及钢材的应力与应变关系

不同的纤维化学成分不同，力学性能差别就较大，相应FRP复合材料的力学性能也表现出很大的差异。三种FRP材料中，碳纤维的强度最高，弹性模量也超过钢筋，但延伸率较低；玻璃纤维的强度和弹性不如碳纤维，但有较好的延伸率；芳纶纤维介于两者之间。几种FRP复合材料的力学性能，见表1-1。

表1-1 常用纤维的力学性能

纤维类型	拉伸强度 (MPa)	拉伸模量 (MPa)	延伸率 (%)
玻璃纤维 (GFRP)	3100 ~ 3500	72.4 ~ 81.4	4.0 ~ 5.0
碳纤维 (CFRP)	3500 ~ 4800	207 ~ 380	0.6 ~ 1.9
芳纶纤维 (AFRP)	3500 ~ 4100	130 ~ 190	2.0 ~ 2.8

在工程应用中，按材料形式的不同，FRP可分为以下几类。

(1) 片材：包括布材和板材，见图1-2。一般是通过环氧树脂类黏结剂粘贴于结构表面，是用于结构补强与修复加固最多的一种材料形式。其中布状材料的使用量最大，但由于板状材料的强度高，近几年来使用量增长很快。

(2) 型材：包括多种形状，主要有实心、空心及蜂窝结构形式，见图1-3。国外对FRP型材进行了研究，并在部分桥梁中使用。

(3) 棒材：通常作为代替传统钢筋的材料，既可用于已建结构的补强加固，也可用于新建结构中，见图1-4。对棒材进行张拉后，可对混凝土结构进行体内或体外预应力增强式加固，很多国家将FRP筋应用到混凝土桥梁中。

(4) 管材：将FRP纤维材料在工厂按特定工艺制成的不同规格的管状结构物，见图1-5，它可以用来约束和保护混凝土结构，既可用于地下建筑结构，也可用于地上建筑结构中。

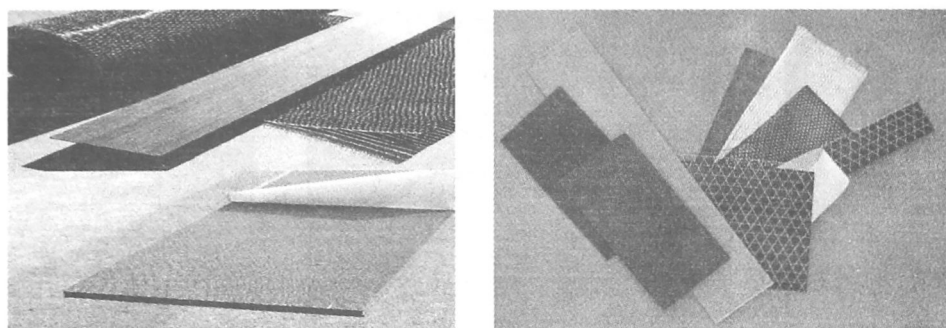


图1-2 FRP片材（布和板）

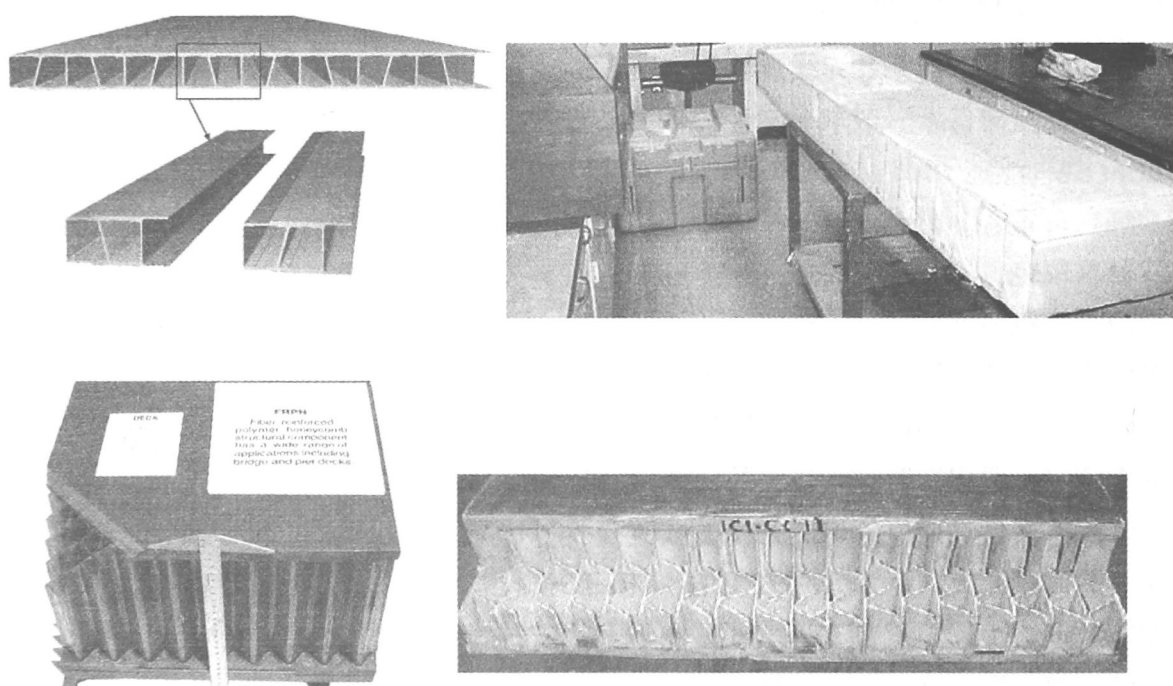
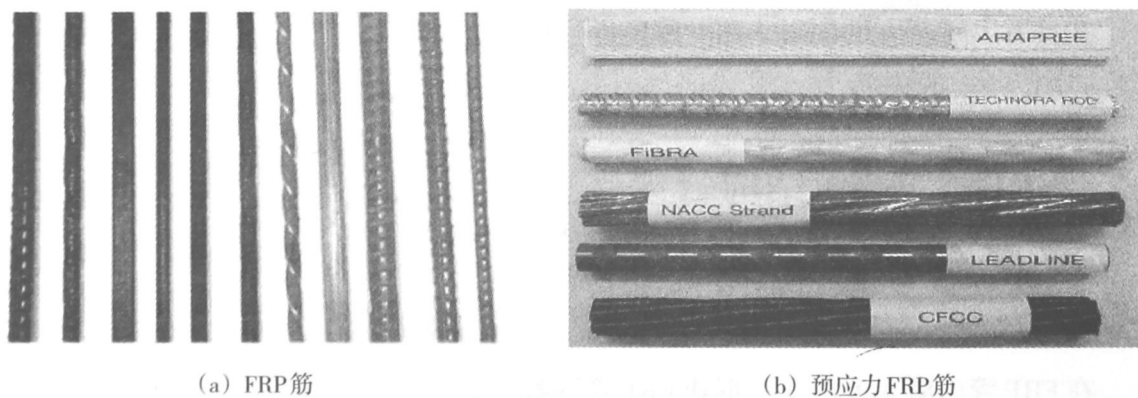


图1-3 FRP型材



(a) FRP筋

(b) 预应力FRP筋

图1-4 FRP棒材

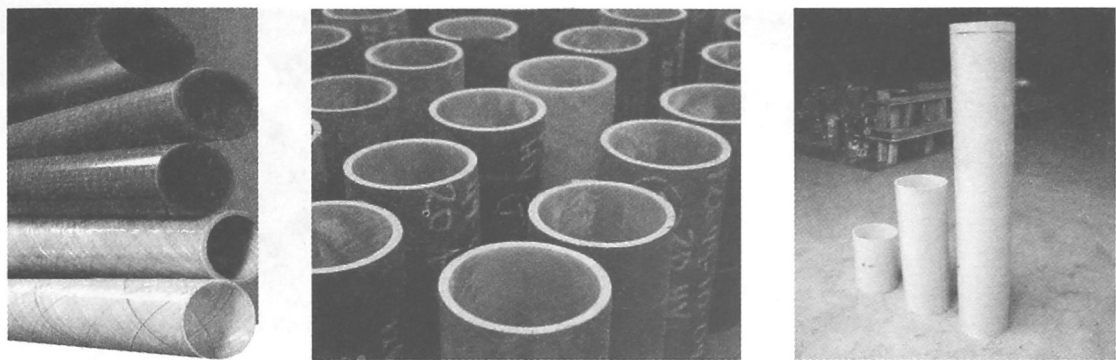


图 1-5 FRP 管材

1.1.2 FRP 材料特点

FRP材料的本构关系为线弹性关系，破坏时呈现脆性。在实际应用中为了保证结构有一定的安全储备，一般取名义应力作为材料的破坏应力。FRP材料的力学性能决定其有如下主要优点。

(1) 自重轻，施工方便。FRP材料与钢材相比，密度仅为钢材的25%或更低，因此，自重较轻，施工工序简单，从而可降低施工费用和工程造价。

(2) 抗拉强度高。FRP材料的抗拉强度高，在达到极限状态之前，几乎都处于线弹性工作阶段，其抗拉强度明显超过钢筋，与高强钢丝相当。

(3) 抗腐蚀性能好。FRP纤维材料的化学性质比较稳定，不与酸、碱、盐等化学物质发生反应，适用于腐蚀性较大的环境中，具有很好的抗腐蚀性能。

(4) 抗疲劳性能好。FRP材料的疲劳强度可达其拉伸强度的70%~80%，而一般金属材料的疲劳强度仅为其拉伸强度的40%~50%，由此可见，FRP材料具有很好的抗疲劳性能。

(5) 弹性性能好。FRP材料的应力与应变关系曲线近似呈线弹性，在发生较大变形后仍能恢复原状，塑性残余变形很小，具有较好的弹性性能。

(6) 介电性能优越。FRP材料是绝缘体，在高频率电磁场中，FRP不会发生类似钢材那样由于涡流效应而产生热量的现象。

在具有上述优点的同时，FRP材料也存在一些不足，主要有：抗剪切强度和弹性模量低、耐火性差等。

1.2 FRP管混凝土结构

1.2.1 FRP管混凝土结构特点

在FRP管内灌入混凝土，形成FRP管混凝土结构。这种新结构，一方面，FRP管充当轻质量的模板，减少了传统的模板花费和拆除时间；另一方面，FRP管约束内部混凝土，使核心混凝土受纵向荷载作用时，其横向变形受到限制，处于三向受力状态，提高

了混凝土的抗压承载能力，特别是改善了混凝土的抗震延性，并且，FRP管也起到类似箍筋的作用，通过限制混凝土斜裂缝的开展起到抗剪加固作用，从而提高构件的斜截面抗剪能力；再者，内部混凝土的存在缓解了薄壁FRP管的局部屈曲，增加了其稳定性；特别是，在其内部设置带箍筋的纵向钢筋、型钢，或者同时设置受力钢筋和型钢，可以增加构件的抗剪能力和抗震延性。FRP管混凝土结构在高层建筑、大跨度桥梁，特别是在地质条件复杂、盐度大、腐蚀性强及湿度高等不利环境中具有广阔的应用前景。

FRP管混凝土结构的优越性具体表现在：（1）整体性好。由于FRP材料与混凝土的线膨胀系数接近，FRP约束混凝土能够承受剧烈的温差变化，使它们受热后变形协调。（2）承载力高。由于混凝土受到FRP管的约束而提高了构件的承载能力。（3）抗震性能好。FRP轻质高强且比模量高于钢材，FRP约束混凝土可以减少结构重量，减少地震造成的危害。（4）介电性能优越。FRP材料是绝缘体，在高频率电磁场中，FRP不会像钢材那样由于涡流效应而产生热量，因热应力产生混凝土开裂。（5）非磁性。FRP为非金属材料，适合于做非磁性环境要求的结构。（6）抗腐蚀性能好。FRP材料具有优越的抗腐蚀能力，在使用中，FRP管长期充当恶劣环境中混凝土和钢筋的保护层，避免混凝土和钢材腐蚀。（7）施工速度快。在新建结构中，FRP管充当轻质量的模板，减少了传统的模板花费和拆除时间，增加施工速度。FRP管约束混凝土，提高了构件的承载力，但是，承载力提高程度不是简单的叠加，FRP管对混凝土的约束作用，见图1-6和图1-7。

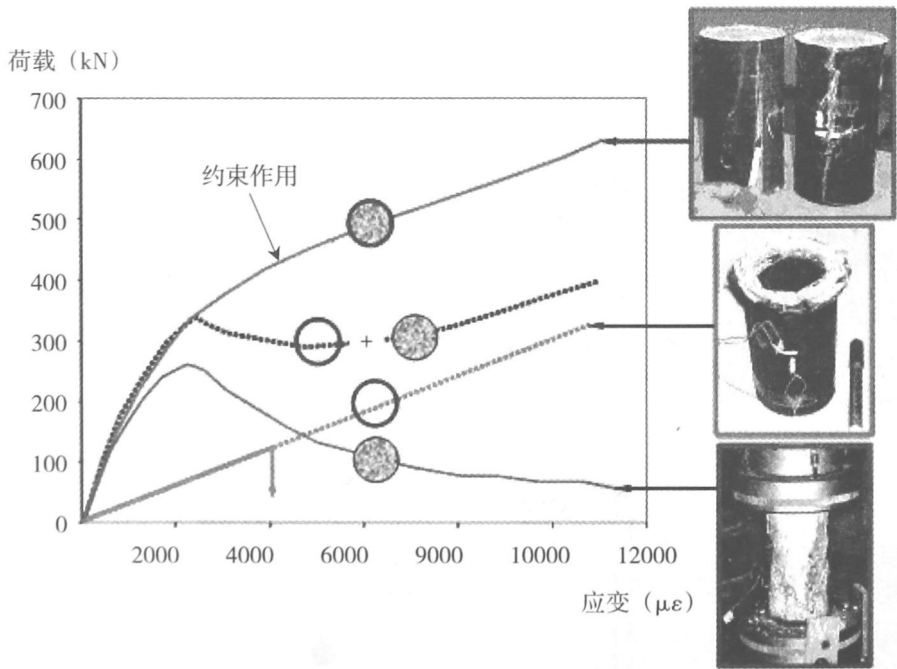


图1-6 FRP管对混凝土的约束作用 (Fam and Rizkalla, 2001)

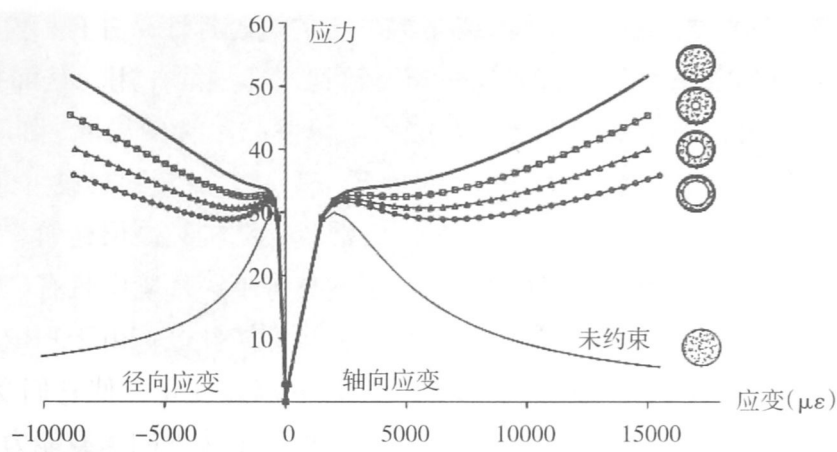


图 1-7 FRP 管约束混凝土的应力与应变关系 (Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R., 1988)

1.2.2 FRP 管混凝土结构应用

自从 1940 年将 FRP 应用到防御工程中后，又逐渐扩大到其他工业，主要包括航空业、海洋业、电子运输业、石油与天然气，以及土木建筑业。在桥梁等基础建设中已经大量使用 FRP 作为加固、修复在役建筑。FRP 管混凝土结构主要还是应用在新的土木建筑结构中，最近几年，美国混凝土协会 ACI (440) 已经出版了内部 FRP 筋 (440.1R-06)、黏结加固 (440.2R-08)、预应力 FRP 筋 (440.4R-04)，以及 FRP 材料的试验方法 (440.3R-04) 的设计指导。然而，尚没有关于 FRP 管混凝土的相关设计指导，主要是因为在这个研究领域缺少试验数据，使出版 FRP 管混凝土的设计与施工指导及标准出现困难。

FRP 管混凝土结构主要应用在土木工程中的基础桩、承重柱、桥梁墩柱及信号标志等，见图 1-8。

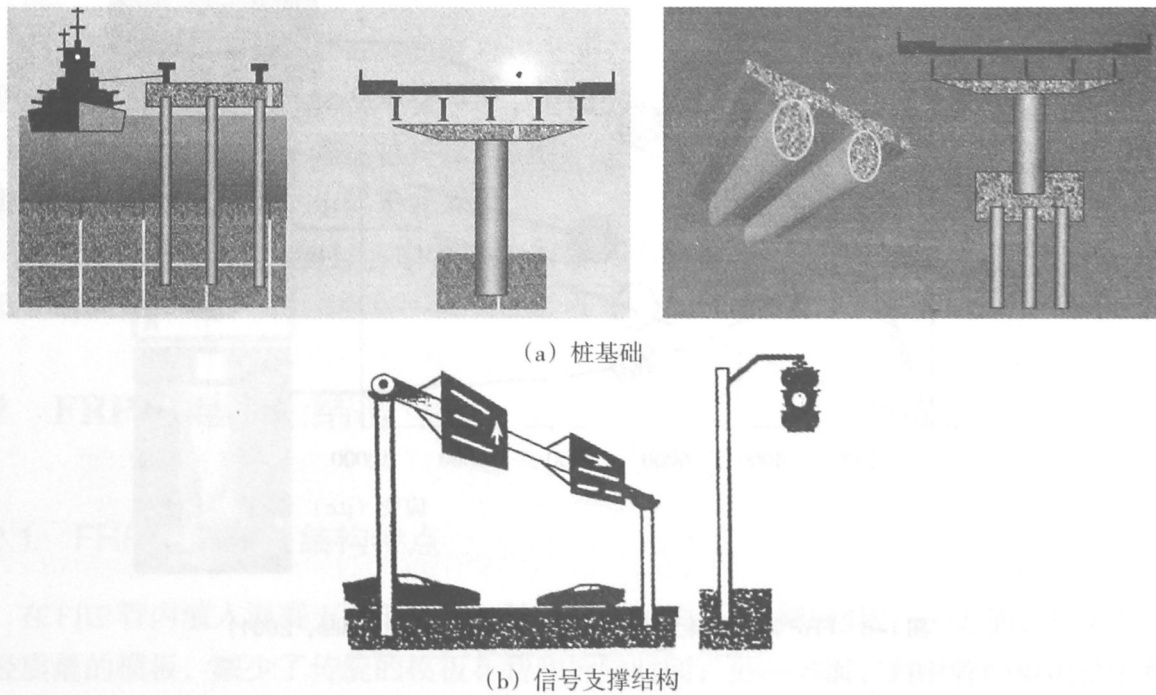


图 1-8 FRP 管混凝土应用

传统的桩基材料主要有混凝土、钢材及木材，而这些结构材料在使用中受到环境限制和高额的维护费用，特别是在恶劣环境使用中将受到严格条件限制。实践证明，在美国，每年需要用于修复和更换桩基的费用超过1亿~2亿美元。传统腐蚀桩^[25, 33]，见图1-9。高额的修复、维护费用促使美国交通部门开始对FRP材料在土木基础工程中的应用进行研究。



(a) 腐蚀的钢桩

(b) 腐蚀的混凝土桩

(c) 腐蚀的木桩

图1-9 传统腐蚀桩 (文献 [25], [33])

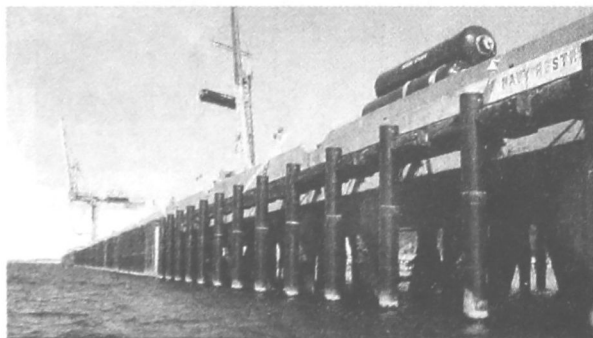
在国外，很多工程应用了FRP管混凝土^[8, 24]，见图1-10。图1-10 (a) 为美国 Lancaster Composite生产的防御桩，图1-10 (b) 为美国PPI生产的防御桩，图1-10 (c) 为美国华盛顿的防御桩，图1-10 (d) 为美国生产的长度为13700mm、直径为305mm的漂浮装卸台，图1-10 (e) 为美国东部维吉尼亚的NOTTOWAY桥梁。FRP管混凝土桩的施工过程^[28]，见图1-11。



(a) Lancaster Composite生产的防御桩



(b) PPI 生产的防御桩



(c) 防御系统桩

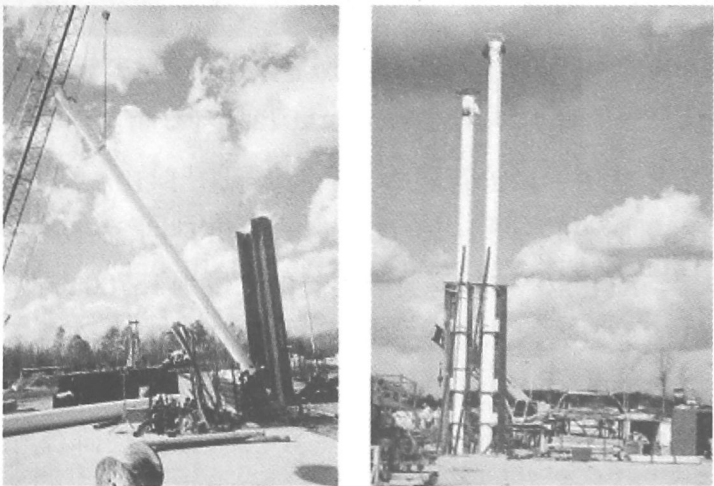


(d) 美国生产的漂浮装卸台



(e) 维吉尼亚的NOTTOWAY桥梁

图1-10 FRP管混凝土应用



(a) 制作钢筋笼和浇筑混凝土

