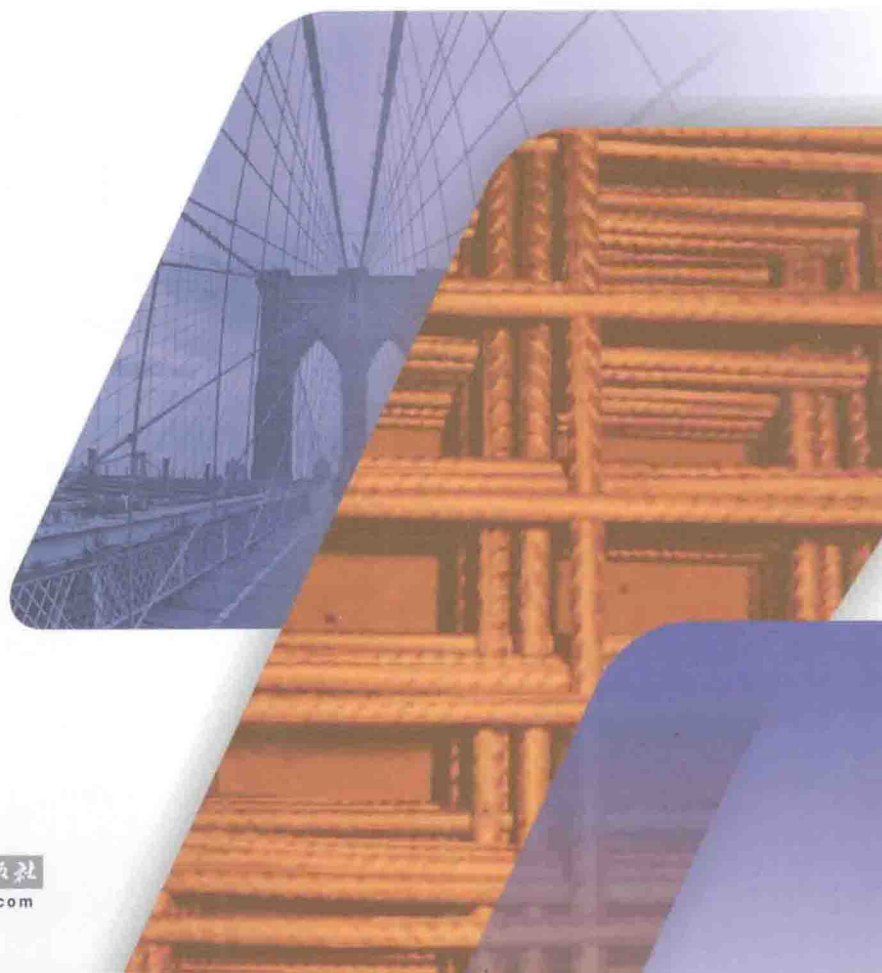


桥/梁/新/材/料/与/新/技/术/丛/书

CONCRETE STRUCTURE REINFORCED WITH COMPOSITES OF FIBER

纤维复合材料配筋 混凝土结构

金文成 郑文衡 周小勇 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

桥梁新材料与新技术丛书

纤维复合材料配筋混凝土结构

金文成 郑文衡 周小勇 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书介绍一种有机复合材料——FRP 筋材,其既可作为普通混凝土配筋,亦可作为预应力混凝土的预应力束。在讨论这种复合材料特性的基础上,本书着重介绍针对这种新型高性能结构材料的预应力工艺,其中较为关键的是 FRP 制锚具。由此实现完全非金属混凝土结构,这种结构具有不锈蚀、耐久性好、质量轻等特性。结合实际桥梁设计,针对桥梁工程的实验室试验和现场试验研究,系统化地探讨了这种材料的预应力张拉技术。这是一本理论联系实践的专著。

图书在版编目(CIP)数据

纤维复合材料配筋混凝土结构/金文成,郑文衡,周小勇著. —武汉:华中科技大学出版社,2013.8

ISBN 978-7-5609-9318-8

I. ①纤… II. ①金… ②郑… ③周… III. ①纤维增强混凝土-混凝土结构
IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 193502 号

纤维复合材料配筋混凝土结构

金文成 郑文衡 周小勇 著

策划编辑:俞道凯

责任编辑:简晓思

封面设计:范翠璇

责任校对:张会军

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉正风天下图文有限公司

印 刷:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:18.75

字 数:375 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:78.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

序一

桥梁科学是一个包含建筑学、结构力学、固体力学、土木工程学、工程资源管理学、材料学等多个学科的综合领域。这是一个古老的工程领域,而且到目前为止,桥梁科学仍然处在不断的更新与发展中。桥梁科学每次大踏步的前进,都伴随着新材料的运用;而每次这样大规模的发展,都使得桥梁的跨越能力、承载能力、通过容量、耐久性明显增大,同时桥梁的造价明显降低。古代桥梁的建造,经历了原始石板、木质桥梁、石拱桥等阶段,以石拱桥为其最高境界。近代兴起钢铁桁架梁桥与悬索桥、混凝土梁桥、预应力混凝土斜拉桥、预应力混凝土桁架桥等,是桥梁科学蓬勃发展的标志。而复合材料是材料科学促进桥梁事业的一个闪光的亮点,实际上,钢筋混凝土本身就是一种复合材料,而预应力钢筋混凝土则是这种复合材料的新版本。金文成教授、郑文衡教授和周小勇博士等人,经过近十年的潜心研究与工程实践,解决了因钢铁锈蚀而影响预应力混凝土结构寿命的问题,明显增加了中等跨径桥梁的耐久性、跨越能力与承载能力,是桥梁科学领域创造性的进步。FRP材料,又称纤维增强高分子材料,英文是Fiber Reinforced Polymer,与钢铁材料的性质与加工方式有所不同,因此系统化地开发相应技术,是桥梁科学上革命性的创举。金文成教授等人的著作,总结了他们系统化的工作,与实际建造的桥梁一起,揭开了FRP材料配筋混凝土桥梁建设崭新的一页,因此欣然为之序。

方秦良
2014.05.24

序二

混凝土结构的配筋材料传统上采用普通钢筋、精轧螺纹钢、高强钢丝和预应力钢绞线等金属材料。这些金属配筋材料具有易锈蚀的缺点,严重影响了混凝土结构的耐久性。鉴于此,本书针对钢筋锈蚀问题提出相应对策,论证采用纤维增强塑料(FRP)材料来代替钢材应用于配筋混凝土结构是行之有效的解决方案。

FRP材料密度小、强度高、耐腐蚀、抗疲劳、蠕变率小,而且FRP材料的无锈蚀特性弥补了钢筋混凝土结构耐久性不足的缺点,在土木工程领域具有广阔的应用前景。FRP材料还具有弹性模量低、破坏前无塑性阶段等与钢筋不同的显著特征。FRP混凝土构件的结构性能与传统钢筋混凝土相比,存在着较大的差异,因此,需要研究FRP材料本身的力学性能、FRP配筋混凝土构件的受力性能、相应的理论计算方法,以及工程应用的诸多关键技术。

本书综述了大量关于FRP的文献,总结了一系列试验的成果,陈述了研发符合工程要求的FRP筋的过程,其中包括FRP预应力束的研制。同时,阐述预应力锚具的工作原理和适用条件。通过理论分析和试验研究,研发了超高强混凝土锚固系统、FRP片材锚固系统、GFRP(玻璃纤维增强塑料)夹片式锚具等完全非金属锚固系统。通过理论计算、数值分析和试验分析,确定FRP波形锚具的锚固长度、夹片式锚具内壁倾角、锚具长度、锚环内壁和夹片角度差等参数。到目前为止,完全非金属GFRP夹片式锚固系统锚固力达到90 t,已通过鉴定,达到国际领先水平。本书描述了这项成果在工程中成功应用的实例。

在此基础上,书中针对FRP筋线弹性、弹性模量低和耐腐蚀等特征,对FRP配筋(含预应力)混凝土梁的界限受压高度作出分析,确定结构的破坏模式,提出FRP配筋混凝土梁受弯承载力、开裂弯矩、裂缝宽度(普通FRP配筋混凝土梁)和挠度的计算公式,并通过ANSYS分析、试验梁结果验算FRP配筋混凝土梁计算理论的正确性。

本书表述的理论与实验室试验结果,在两项依托工程中付诸实践。其一为湖北宜巴公路上宜昌秭归境内松树坳大桥新建工程,其二为船舶重工某试验场的无磁实验室。

在第一项工程中,对其中第一跨20 m预应力空心板试验梁应用了课题研究



成果,以 $19\Phi 6$ mm 的 CFRP 筋束代替钢绞线,以 GFRP 夹片式锚具代替现有锚具,以 GFRP 筋代替普通钢筋。通过对一片实际尺寸试验梁的荷载试验,验证了本书介绍的完全非金属材料应用于桥梁结构的可行性。

在第二项工程中,将 FRP 配筋混凝土用于大跨度房屋结构,在国内属于首创。而且其无磁特性,能够满足业主的使用要求。如果不采用 FRP 配筋混凝土,必将采用铜条或无磁钢代替钢筋,成本昂贵,因此,FRP 配筋混凝土大跨度房屋结构不仅是一个大胆的尝试,而且是一个成功的工程范例。

值得特别指出的是,以往基于钢铁配筋的混凝土(以及预应力混凝土)梁的设计,采用固定中性轴理论作为设计依据,在实践中近似程度较大。因为实际上梁的受拉部分可能产生裂缝,而裂纹出现以后,有裂纹的截面已经不能够提供弯矩,因此,中心轴在承载后是移动的,而实际的有效惯性矩也与裂纹出现以前的情形不同。本书第 4 章引入换算惯性矩(亦称毛惯性矩)和有效惯性矩概念进行分析,并在试验中加以验证,而第 8 章运用已经验证的公式进行分析,理论上有创见,技术上具有先进性,在实践中更接近实际情况,是本书的亮点之一。

FRP 肇始之初系用于航空航天,近年来在土木工程领域的应用正在我国、西欧、美国受到重视并较快发展。

本书作者理论联系实际做了颇多有成效的工作,书中行文系统化地表述了作者的思想,介绍了所做的理论分析、试验研究以及依托工程应用,对于新材料和桥梁设计领域的科学技术工作者是独具启发意义的,为此我特意向广大读者推荐这本书,是为之序。

陳博

2014/5/1 于京西三里河

前 言

目前,混凝土结构的配筋材料主要采用的是由钢材加工的钢筋、钢丝和预应力钢绞线,这种应用已经相当成熟、普遍。随着应用的广泛化,这种配筋结构的缺点也日渐暴露。首先,钢筋作为配筋材料的致命弱点是锈蚀,钢材的锈蚀会改变钢材的化学成分,使其丧失优秀的物理力学性能,从而导致钢筋混凝土和钢绞线预应力混凝土构件因失去承载能力而破坏。钢筋的锈蚀严重影响了混凝土结构的耐久性^[1]。其次,随着技术水平的提高和科学理论的发展,现代社会对建筑材料的要求更高,以强度为例,实现超高强度钢筋(钢丝)难度就比较大。另外,钢材属消耗性材料,系不可再生资源,从人类可持续发展战略的高度看,寻找新材料替代钢材用作建筑材料是社会发展的必然。因此,全球许多学者早已开始研究对策,经过 40 多年的知识积累,发现用非金属材料来代替钢材是行之有效的方法。这种方法不仅可以从根本上避免了钢材锈蚀问题,而且还有一系列的其他优点^[2-3],如某些材料具有强度更高、抗疲劳性能更好、非磁性、质量轻、报废材料易于处理等优点。如发挥其质量轻的优势,用于斜拉索中垂度效应很小^[4]。可以预见,钢筋混凝土结构的耐久性问题将日益突出,而非金属材料的性能不断改善,用非金属材料代替钢材的技术将走向成熟。因此,完全非金属混凝土结构有广阔的应用前景。

目前,用于取代钢筋(钢丝)和钢绞线的非金属材料主要是 FRP 材料,即高分子材料复合纤维筋,包括碳纤维增强的、芳纶纤维增强的以及玻璃纤维增强的 FRP 筋。其中,虽然碳纤维塑料筋的综合性能最好,但是其成本也是最高的。各种 FRP 材料在国外都有广泛应用,日本、美国和欧洲一些国家已经有较多的桥梁采用了这种结构。但是在国内,这种结构目前主要还是用于旧混凝土结构的加固、补强;而新建结构中作为结构的主要承载材料的应用还比较少。经过少数单位十几年的初步探讨,我国目前也具备了将非金属材料用于新建结构中的技术基础。其代表性成果:中国土木工程学会已经召开七届全国建设工程 FRP 应用学术交流会,多所高校也对 FRP 材料做了多方面的研究。总的说来,这些研究还比较零散,没有形成系统化,因而还不能应用于实际工程结构中。本书从系统化角度入手,讨论 FRP 筋材配筋混凝土结构的理论与实践。

纤维增强高分子材料(fiber reinforced polymer)筋是新型的复合材料^[1]。根据功能的不同,可分为普通 FRP 筋材、预应力筋、预应力索和预应力片材。按照原材料的区别,FRP 材料包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、玄武岩纤维等。所



有的 FRP 材料都具有强度高、质量轻、耐腐蚀、抗疲劳等优点,是理想的配筋材料。然而与钢材相比,它又具有特殊性,例如,其横向强度很低。FRP 筋还具有弹性模量低、破坏前无塑性等与钢筋不同的显著特征,因此,FRP 筋材配筋混凝土结构是工程上具有实际意义的研究内容。FRP 复合材料的原材料来源丰富,作为钢材的替代品,符合国家对新资源开发的需求。从这一点看,FRP 筋材配筋混凝土结构的研究具有深远的战略意义。为此,我们进行了系统化的研究,并将结果汇集于本书。

本书在已有研究的基础上,着眼于配筋混凝土结构的深入开发,具体研究内容如下:

- ① 复合纤维材料筋作为混凝土配筋材料的各项物理力学性能,混凝土对它的握裹力、混凝土对它的黏结力、温度变化时热应力的特性等;
- ② 复合纤维材料筋配筋混凝土结构构件的设计理论和计算方法;
- ③ 复合纤维材料筋的成形技术及工艺;
- ④ 非金属材料锚具的研制和开发;
- ⑤ 复合纤维材料预应力筋的张拉工艺技术。

通过以上系统化研究,形成了一整套复合纤维材料筋配筋混凝土结构的理论及相应工程技术,实现完全意义上的非金属材料配筋混凝土结构,从而彻底解决钢筋配筋混凝土结构所面临的诸多问题,并将此项理论和技术推向实际的工程。

桥梁科学是一个古老的工程领域,且到目前为止桥梁科学仍在进步与发展。新材料与新技术正在引导桥梁科学不断前进。本书是“桥梁新材料与新技术”序列中的一本,正是应桥梁科学的实际需要而做的努力。

中国工程院院士方秦汉教授与国家级专家、中国复合材料工业协会研究员陈博先生分别从桥梁科学与新材料两个方面为本书作了序,在此表示感谢!

对本书的内容有贡献的人员有:简方梁、李海霞、怀臣子、秦波、黄琮、翟锋、白全增、叶大伟、万娟、唐智强、徐冰霜,特此致谢!

另外,感谢重庆国际总工、浙江石金玄武岩纤维有限公司顾问石钱华先生在 FRP 推广与开发中提出的宝贵建议。

著者
2014 年 5 月

目 录

第 1 篇 普通 FRP 配筋混凝土结构

第 1 章 FRP 筋物理力学性能	1
1.1 FRP 筋的分类	1
1.2 FRP 筋的物理性能	2
1.3 FRP 筋的力学性能	3
第 2 章 FRP 筋与混凝土的黏结锚固性能分析	8
2.1 黏结性能概念	8
2.2 FRP 筋与混凝土黏结机理	8
2.3 黏结界面应力	9
2.4 锚固长度的计算	10
2.5 影响 FRP 筋与混凝土黏结性能的因素	11
2.6 FRP 配筋混凝土结构设计要点	11
第 3 章 FRP 配筋混凝土结构基本计算原理	12
3.1 结构设计的发展简述	12
3.2 极限状态设计的基本概念	13
3.3 普通钢筋混凝土结构设计方法	14
3.4 FRP 配筋混凝土结构设计原理	15
第 4 章 FRP 配筋混凝土梁正截面承载能力计算	24
4.1 基本假定	24
4.2 确定平衡配筋率	24
4.3 确定破坏形态	25
4.4 正截面抗弯承载力的一般计算方法	25
第 5 章 FRP 配筋混凝土梁使用性能分析	30
5.1 FRP 配筋混凝土梁换算截面惯性矩计算	30
5.2 FRP 配筋混凝土梁开裂弯矩计算	32
5.3 FRP 配筋混凝土梁挠度计算	34
5.4 FRP 配筋混凝土梁裂缝宽度计算	36
5.5 关于 FRP 筋配筋混凝土梁设计的建议	38



第2篇 FRP 预应力混凝土结构

第6章 GFRP 夹片式锚具	40
6.1 FRP 筋的锚固性能要求	40
6.2 FRP 锚具材料及构造形式的选择	41
6.3 传统夹片式锚具失效的原因	42
6.4 GFRP 制锚具尺寸的拟定	43
6.5 GFRP 制夹片式锚具力学分析	46
6.6 单孔夹片式锚具强度校核	52
6.7 锚具的接触分析问题	54
6.8 锚具的“切口效应”	56
6.9 有限元建模过程	57
6.10 有限元结果分析	59
6.11 有限元分析结论	63
第7章 FRP 预应力混凝土梁承载力计算	64
7.1 FRP 预应力混凝土梁破坏形态	64
7.2 材料应力-应变关系	65
7.3 预应力 FRP 筋混凝土梁计算的基本规定	67
7.4 预应力损失计算	69
7.5 FRP 预应力混凝土构件承载力计算	70
7.6 20 m FRP 预应力空心板承载力计算实例	72
第8章 FRP 预应力混凝土梁使用性能分析	79
8.1 FRP 预应力混凝土梁抗弯刚度	79
8.2 FRP 预应力混凝土梁应力计算	80
8.3 FRP 预应力混凝土梁挠度计算	82
8.4 FRP 预应力混凝土梁裂缝宽度计算	83

第3篇 试验研究

第9章 GFRP 筋张拉试验	85
9.1 GFRP 筋张拉试验	85
9.2 改进后的 GFRP 筋张拉试验	90

第 10 章	FRP 配筋混凝土梁的抗弯试验及数值分析	95
10.1	FRP 配筋混凝土梁抗弯试验	95
10.2	FRP 配筋混凝土梁数值分析	107
第 11 章	碳纤维预应力筋的研发	112
11.1	碳纤维丝张拉试验	112
11.2	碳纤维束张拉试验	116
11.3	碳纤维绳拉伸试验	122
11.4	D6 碳纤维单筋力学试验	132
11.5	碳纤维预应力筋束	138
第 12 章	高强混凝土锚具	140
12.1	锚具尺寸的拟定	140
12.2	高强混凝土锚具数值分析	143
第 13 章	GFRP 夹片式锚具性能测试试验	149
13.1	硬度试验	149
13.2	锚环受压试验	150
13.3	锚环-夹片受压试验	151
第 14 章	GFRP 夹片式锚固系统张拉试验研究	156
14.1	GFRP 锚具—GFRP 单筋锚固张拉系统试验	156
14.2	GFRP 锚具—CFRP 筋预应力筋束锚固张拉系统试验	164
第 15 章	FRP 预应力混凝土梁抗弯数值分析	171
15.1	模型梁概况	171
15.2	有限元建模	172
15.3	有限元计算结果分析	175
15.4	数值分析结论	177
15.5	影响 FRP 预应力混凝土梁弯曲性能的因素	178
15.6	应用实例	182
附录 A	FRP 筋施工工艺	184
A.1	原材料	184
A.2	FRP 筋操作	184
附录 B	CFRP 预应力筋束张拉施工工艺	186
B.1	施工工艺流程	186
B.2	施工准备	187
B.3	千斤顶的定位	189



B.4	预应力张拉	190
B.5	张拉过程控制	190
B.6	材料和设备	193
B.7	质量控制	194
B.8	安全措施	194
附录 C	20 m 预应力 CFRP 空心板试验梁施工	196
C.1	依托工程项目简介	196
C.2	试验梁简介	196
C.3	试验梁制作过程	198
C.4	试验梁现场施工张拉情况	199
C.5	张拉应力控制及预应力损失考虑	202
C.6	试验梁张拉总结	203
附录 D	20 m 预应力 CFRP 空心板荷载试验	204
D.1	试验概况	204
D.2	试验目的	205
D.3	试验内容	205
D.4	仪器设备	206
D.5	试验梁初始状态	206
D.6	梁的静载试验	206
D.7	荷载试验结果	212
D.8	试验小结	230
附录 E	FRP 片材锚固系统	231
E.1	FRP 片材锚固系统理论分析	231
E.2	FRP 片材锚固系统数值分析	236
E.3	FRP 片材锚固系统张拉试验研究	241
E.4	FRP 预应力片材锚固系统的应用和施工工艺研究	246
附录 F	湖北金力工程复合材料有限公司企业标准 252	
F.1	FRP 筋材(Q/HJL001—2011)	252
F.2	FRP 锚具(Q/HJL 002—2011)	261
F.3	FRP 锚杆(Q/HJL003—2011)	268
F.4	FRP 螺母与托盘(Q/HJL004—2011)	277
参考文献		285

第 1 篇 普通 FRP 配筋混凝土结构

第 1 章 FRP 筋物理力学性能

1.1 FRP 筋的分类

FRP 筋最基本的分类方法是根据纤维塑料筋中所采用纤维类型的不同,将 FRP 筋分为碳纤维塑料筋(CFRP)、芳纶纤维塑料筋(AFRP)、玄武岩纤维塑料筋(BFRP)、玻璃纤维塑料筋(GFRP)^[12](见图 1-1)。

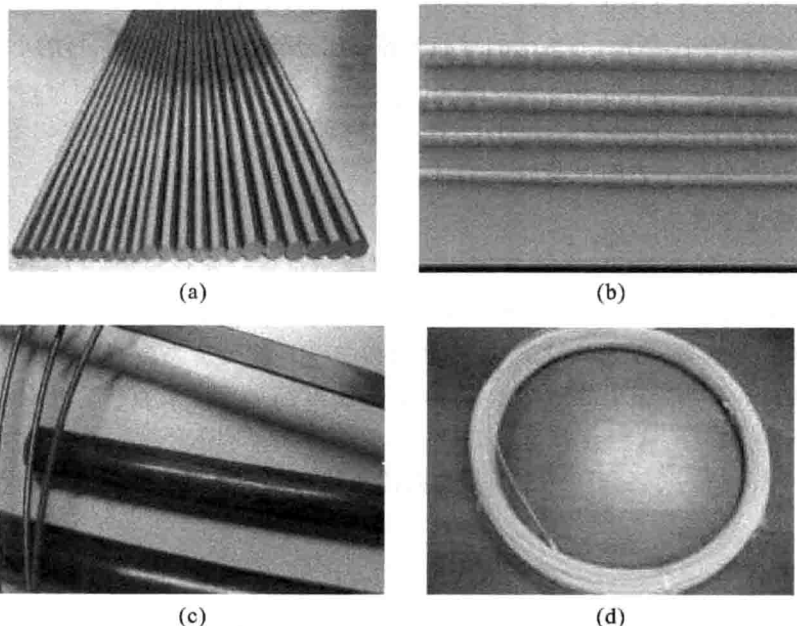


图 1-1 几种不同类型 FRP 筋材

(a)碳纤维塑料筋(CFRP);(b)芳纶纤维塑料筋(AFRP);
(c)玄武岩纤维塑料筋(BFRP);(d)玻璃纤维塑料筋(GFRP)



根据加工方法的不同,FRP 筋还可分为:①将若干股 FRP 筋用环氧树脂黏结制作成预应力 FRP 筋;②为增加 FRP 筋与混凝土的黏结性能,在其表面做出螺纹的螺纹 FRP 筋;③截面形式为矩形,对其表面进行滚花处理的矩形 FRP 筋;④为增强 FRP 筋与混凝土的黏结强度,对其表面进行黏砂处理的黏砂 FRP 筋^[13]。

1.2 FRP 筋的物理性能

FRP 筋的物理性能具体来说分为以下几个方面^[4]。

1. 密度

FRP 筋的密度小,各种 FRP 筋的密度在 $1\,850\sim 2\,100\text{ kg/m}^3$ 之间,仅为钢筋密度的 $16\%\sim 25\%$,因而其运输成本低、在施工现场安装时间短、施工方便,且有利于减轻结构自重,在修建大跨度桥梁、高层建筑结构中效果尤其明显。

2. 热膨胀系数

FRP 筋的热膨胀系数在其纤维的纵向和横向上不同,差别大小取决于纤维和树脂的类型以及纤维体积率,纵向热膨胀系数主要取决于纤维的性质,而横向热膨胀系数主要由树脂的特性决定,其横向的热膨胀系数比混凝土的稍大,但是因为其横向弹性模量较钢材的小,因此,与传统的钢筋配筋相比,其热应力比同类钢材的小。

根据 M. Okazaki、N. Santoch 和 K. Noritake 等通过试验得出结论:试验中未出现因温度变化而引起混凝土与 FRP 筋之间的黏结失效,FRP 筋可以和混凝土共同工作,不会产生大的温度应力。

3. 热稳定性

FRP 筋由纤维和聚合物基体组成,当温度超过玻璃转化温度(glass transition temperature) T_g 时,由于聚合物分子结构改变,聚合物软化,弹性模量会减小。

试验结果表明:在 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 下,GFRP 筋和 CFRP 筋抗拉强度减小 20% 。另外,高温对 FRP 筋与混凝土的黏结也有影响,当温度超过 T_g ,聚合物软化,混凝土与 FRP 筋的应力传递性能会下降。在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 下,FRP 筋的黏结强度分别减小 $15\%\sim 25\%$ 和 $60\%\sim 70\%$ 。随着耐高温树脂材料的不断出现,这种情况正在大大改变。

4. 耐久性

这里所说的耐久性指的是在特殊环境下,特别是化学环境下,保持其力学性能的能力。FRP 筋与钢材相比的主要优势就是对酸、碱及土壤等物质的化学腐蚀有很强的抵抗力。纤维本身和黏结材料具有耐腐蚀的特性,在腐蚀性的环境中工作时,FRP 筋的耐久性一般要大大优于钢筋的,因此,这类结构的后期维修费用低。

但是,各种 FRP 筋在不同环境介质中同样具有不同的耐久性,比如,当 GFRP 筋在碱性环境中持续工作 6 个月后,其抗拉强度下降 25%。AFRP 筋在潮湿的环境下会吸收水分而膨胀,最大吸收量可达自身重量的 8%。

5. 电磁绝缘性

FRP 筋电磁绝缘性好。对于一些有特殊要求的建筑,如雷达站等,钢筋混凝土结构的存在会对整个结构的电磁场产生不利影响;而 FRP 筋是非磁性材料,用 FRP 筋混凝土结构可以满足此特殊要求。

FRP 筋的物理性能与钢筋也有很大差异:FRP 筋的热膨胀系数在其纤维的横向和纵向上不同,横向热膨胀系数与混凝土相近,FRP 筋可以和混凝土共同工作,不会产生大的温度应力,不会出现温度变化引起的混凝土与 FRP 筋之间的黏结破坏;国外很多学者,例如 Hamid Saadatmanesh^[1],对 CFRP 等纤维增强筋做过大量的抗疲劳性试验,试验结果表明,FRP 筋具有良好的抗疲劳特性;FRP 筋对酸、碱及土壤等物质的化学腐蚀有很强的抵抗力,因而耐久性较好,后期维护费用少;FRP 筋为非磁性材料,因而电磁绝缘性好,可以满足特殊的结构要求。

钢筋和市场上主要 FRP 筋的物理特性如表 1-1 所示。

表 1-1 钢筋与各种 FRP 筋的物理性能的比较

材料种类	纵向热膨胀系数 /($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	横向热膨胀系数 /($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)	极限伸长率 /(%)	应力松弛率 (20°C)/(%)
普通钢筋	11.7	11.7	>10.0	—
高强钢丝	11.7	11.7	>4.0	3
CFRP 筋	0.6~1.0	25	0.5~1.7	1~3
AFRP 筋	-6.0~-2.0	30	1.0~4.4	7~20
BFRP 筋	9~12	2~22	>1.8	—
GFRP 筋	8.0~12.0	23	1.2~3.1	1.8

注:表中数值是市场上几种主要产品的参数,不代表所有产品。

1.3 FRP 筋的力学性能

1. 抗拉性能

FRP 筋应力-应变曲线成线性关系,拉伸破坏前不表现任何塑性。FRP 筋的纵向抗拉强度主要取决于纤维材料的抗拉强度(树脂基体的抗拉强度远小于纤维的抗拉强度),单根纤维的抗拉强度很高,大多在 1 500~3 500 MPa 以上,高出钢筋的数倍,但制成棒材后,FRP 筋的抗拉强度有所降低,在 800~3 000 MPa。FRP



筋的抗拉强度和刚度主要受纤维的体积率的影响。此外,某些 FRP 筋的抗拉强度还与横截面的尺寸有关,随着直径的增大其强度有所降低。

笔者创建的公司生产的 GFRP 筋材强度为 1 000~1 200 MPa,CFRP(碳纤维为 T700)筋材强度为 2 800~3 500 MPa。

Faza 和 Ganga 在 1993 年的试验研究表明:当 GFRP 筋的直径从 9.5 mm 增加到 22.5 mm 时,其强度明显下降;对于 CFRP 绞线筋,随着直径的增加,强度没有明显波动;但是对于 AFRP 筋,其强度与直径的关系随着生产工艺的不同而有所变化。因此,特定的 FRP 筋的强度要通过试验来确定。

ACI 440 给出了标准的 FRP 筋强度试验方法,并给出了 FRP 筋保证强度的计算公式,即

$$f_{fu} = f_{fu, \text{ave}} - 3\sigma \quad (1-1)$$

式中: f_{fu} ——FRP 筋的保证强度;

$f_{fu, \text{ave}}$ ——FRP 筋试验值的平均值;

σ ——FRP 筋试验值的平均值的标准方差。

Mutsuyoshi、Uehara 和 Machidn 的研究表明,当每组取 25 个试件进行试验时,ACI 440 给出的标准测试方法的保证率为 99.87%。

通常,FRP 筋的抗拉强度明显超过普通钢筋的,与高强钢丝强度差不多。

2. 抗压特性

FRP 筋纵向和侧向的抗压强度主要取决于树脂基体的强度,由于树脂基体的强度较低,FRP 筋的纵向和侧向抗压强度都较低,因此,应尽量避免将 FRP 筋应用于受压区。

Mallick 等人对 FRP 筋的抗压特性研究结果表明:对于不同的纤维和树脂构成的 FRP 筋,其在受压时可能发生三种破坏模式——斜向拉断、纤维翘曲和剪切破坏。对于 GFRP、CFRP 和 AFRP 筋,其抗压强度分别为其抗拉强度的 55%、78%和 20%。受压时的弹性模量分别为受拉时弹性模量的 80%、85%和 100%。因此,Mallick 等人建议,由于 FRP 筋的弹性模量较低,因此不宜用作受压构件或受弯构件的抗压配筋。一般来说,FRP 筋的抗拉强度越高,其抗压强度也越高。

3. 抗剪强度

相对于其抗拉强度,FRP 筋的抗剪强度较低,层间抗拉强度、抗剪强度都很低,通常为其抗拉强度的 10%~20%,因此,在将 FRP 筋用于混凝土结构中以及进行 FRP 筋材性试验时,需要专门研制的锚具、夹具。

4. 本构关系

不同类型 FRP 筋和钢筋的典型应力-应变曲线的比较结果如图 1-2 所示。

从图 1-2 可以看出,FRP 筋的应力-应变成线性关系,在达到极限抗拉强度之

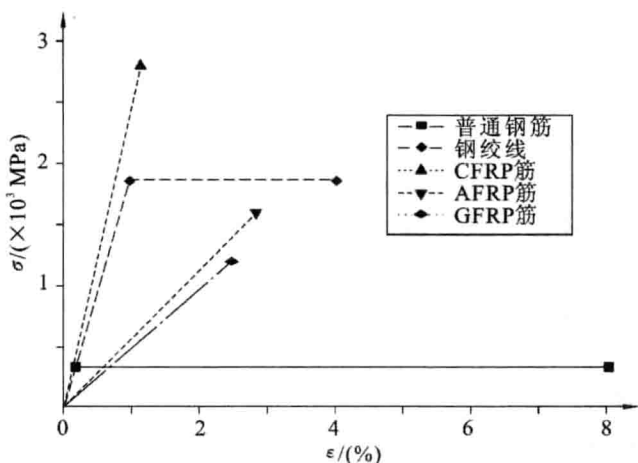


图 1-2 钢筋和 FRP 筋的应力-应变关系图

前,无塑性变形发生,FRP 筋比钢筋的极限应变小(约为钢筋的 1/3 或稍多)。虽然 GFRP 筋的弹性模量较低,但其抗拉强度与钢筋相差不大。而 CFRP 筋的抗拉强度则比钢筋高很多,弹性模量与钢筋相差不大。一方面,低弹性模量将使 FRP 筋混凝土构件在开裂后产生较大的挠度;另一方面,在 FRP 预应力混凝土梁中(以 FRP 作为预应力筋),低弹性模量的 FRP 筋将会减少由于混凝土收缩和徐变引起的预应力损失。

5. FRP 筋的弹性模量

FRP 筋的弹性模量依其纤维类型而异,通常 CFRP 筋的弹性模量在 150~210 GPa,GFRP 筋的弹性模量在 40~50 GPa,AFRP 筋的弹性模在 50~60 GPa。

6. 应力松弛

应力松弛是材料在保持长度不变时应力随时间增长而降低的现象。目前生产厂家所测试的松弛和徐变纪录仅局限在 100 h 范围内。在松弛试验中,若试件伸长量保持恒定,则可以测出荷载随时间的递减是时间的函数,从一定时间的常温松弛试验结果可推断出 100 h 后的松弛应变。AFRP 在空气中和碱性液体中的松弛应变分别为 15%和 20%~25%。在生产商提供的产品性能表中,CFRP 筋在 100 h 后的应力松弛损失约为 3%,同钢筋相差不大。试验表明,CFRP 筋的长期应力松弛很小,在一般设计中可忽略不计,但对重要工程,应力损失可采用 3%。

7. 蠕变破坏

FRP 筋在持续荷载作用下经过一定时间后会突然破坏,这一现象叫做蠕变破坏。持续荷载越大,FRP 筋能承受荷载的时间越小。持续时间在高温、紫外线照射、强碱性、干湿循环或冻融循环等不利环境下会减小。碳纤维最不易蠕变破坏,