

“十二五”国家重点图书出版规划项目

FRP-混凝土桥梁结构

吕志涛 梅葵花 王 鹏 郑宏宇 著

FRP-Concrete Bridge Structures

图书在版编目(CIP)数据

FRP-混凝土桥梁结构 / 吕志涛,梅葵花等著. —南京:
江苏凤凰科学技术出版社,2015.12
ISBN 978-7-5537-5858-9

I.①F… II.①吕… ②梅… III.①纤维增强复合材料—应用—钢筋混凝土桥—桥梁结构 IV.①U448.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 001010 号

FRP-混凝土桥梁结构

著 者 吕志涛 梅葵花 王 鹏 郑宏宇
责任编辑 王明辉 曹婷婷
责任校对 郝慧华
责任监制 曹叶平

出版发行 凤凰出版传媒股份有限公司
江苏凤凰科学技术出版社
出版社地址 南京市湖南路 1 号 A 楼,邮编:210009
出版社网址 <http://www.pspress.cn>
经 销 凤凰出版传媒股份有限公司
照 排 南京紫藤制版印务中心
印 刷 江苏凤凰通达印刷有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 31.5
字 数 630 000
插 页 4
版 次 2015 年 12 月第 1 版
印 次 2015 年 12 月第 1 次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5537-5858-9
定 价 79.00 元(精)

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。

前 言

1995年1月,日本大阪神户地区发生7.4级大地震,随之,在日本掀起了采用高性能非金属纤维增强复合材料(FRP)加固建筑结构和桥梁结构的热潮。当时,非金属纤维增强复合材料中的非金属纤维主要有碳纤维(CFRP)、玻璃纤维(GFRP)和芳纶纤维(AFRP)三种。其中,以碳纤维复合材料(CFRP)的力学性能最好。因此,在工程结构加固中应用最为广泛。阪神地震不久,旅日学者吴智深教授得知本书第一作者在那段时间不仅继续从事预应力的理论分析、实验研究和工程应用,而且还是全国建筑物鉴定与加固技术委员会委员,因此,他及时从日本寄来一大捆碳纤维布及相应的粘贴用粘胶剂,促使我校在国内最早开展CFRP混凝土结构加固技术的研究和应用,以致在2000年全国第一届FRP加固混凝土结构学术会议上,我校有我、吴刚等5人应邀参会并作学术报告,从此,我校成为了我国研究和应用FRP的最主要单位。

截至目前,FRP在土木工程中的应用主要是结构加固。实际上,高性能纤维复合材料(FRP)的最大特点是轻质(钢材容重的1/5)、高强(是预应力高强,钢材抗拉强度的2倍以上)、耐久(不怕酸碱腐蚀)。因此,本书第一作者从2000年起就有计划地开始了FRP-混凝土结构的创新研究,并分别向江苏省和国家自然科学基金委申报了“FRP索结构的应用基础研究”等多项基金课题。

截至2005年,上述课题研究已全部完成,我们撰写发表了多篇学术论文,创新地建造起了CFRP拉索斜拉桥、预应力FRP-混凝土箱梁桥,并研究设计了CFRP索悬索桥等实际工程。这些工程的建成,引起了国家自然科学基金委、科技部的注意,也引来了交通部门的科技人员的重视和参观,他们还希望我们及时出版相应的书籍,供更多人员学习参考。

但是,由于第一作者健康方面的原因,又忙于预应力成果的总结、整理,另外几位作者又忙于教学和科研工作,以致这本书稿拖了下来。直到2015年夏天,我与长安大学公路学院梅葵花副教授商量,请她大力协助、共同早日完成这本书稿,加上江苏凤凰科学技术出版社的大力支持,才加快了这本书稿的出版进度。



本书主要阐述 CFRP 在大跨、特大跨桥梁工程中的研究和创新应用。具体介绍了梅葵花、王鹏和郑宏宇等在攻读博士学位期间所完成的研究和工程实践成果,包括梅葵花的 CFRP 索斜拉桥的理论分析、设计研究和施工研究,郑宏宇的 CFRP 索悬索桥的理论分析和设计研究及王鹏的 CFRP 束体外预应力混凝土梁桥的理论分析、设计和建造研究,以及相应的 CFRP 索的力学性能及锚具的研究和应用等。

名志涛

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 FRP 材料性能

1.1 概述	1
1.1.1 FRP 的组成	1
1.1.2 FRP 产品形式与生产工艺	3
1.1.3 FRP 的特点	5
1.1.4 FRP 的发展概况	7
1.2 CFRP 筋的力学性能	9
1.2.1 短期力学性能	9
1.2.2 长期力学性能	11
1.3 CFRP 筋的抗拉标准强度与强度设计值	13
1.4 FRP 在桥梁工程中的应用现状	13
1.4.1 FRP 片材的工程应用	13
1.4.2 FRP 筋材的工程应用	15
1.4.3 FRP 型材的工程应用	21
1.4.4 全 FRP 结构的工程应用	23
1.4.5 CFRP 在桥梁工程中的应用展望	24
本章参考文献	26



第2章 CFRP 筋锚具的受力分析及静载试验研究

2.1	CFRP 筋锚具的研究现状	30
2.1.1	CFRP 筋锚具的主要类型及特点	30
2.1.2	夹持式锚具研究现状	31
2.1.3	粘结型锚具的研究现状	32
2.2	CFRP 筋夹片式锚具简析	33
2.2.1	锚固机理	33
2.2.2	分析方法	34
2.2.3	CFRP 筋单孔夹片式锚具设计	34
2.2.4	试验方法及分析	35
2.3	CFRP 筋粘结型锚具的受力分析	36
2.3.1	单根 CFRP 筋锚具受力分析	36
2.3.2	多根 CFRP 拉索锚具的三维有限元受力分析	42
2.3.3	小结	55
2.4	CFRP 绞线粘结式锚具的研究	56
2.4.1	粘结式锚具的基本尺寸设计及粘结介质	56
2.4.2	环氧树脂胶粘剂粘结及破坏机理	57
2.4.3	粘结式锚具的受力分析	58
2.4.4	界面剪应力简化分布模式及承载力	65
2.4.5	小结	66
2.5	CFRP 筋粘结型锚具试验研究	67
2.5.1	试验介绍及试验索制作	67
2.5.2	试验装置及试验过程	70
2.5.3	试验结果及分析	71
2.5.4	小结	75
	本章参考文献	76

第3章 CFRP 索斜拉桥研究与建设

3.1 CFRP 拉索的静、动力特性分析	79
3.1.1 拉索静、动力问题概述	79
3.1.2 斜拉索静力设计计算	81
3.1.3 CFRP 拉索与钢拉索的静力特性比较	86
3.1.4 CFRP 拉索的自振特性	91
3.1.5 小结	96
3.2 CFRP 拉索的非线性参数振动	97
3.2.1 斜拉索的风致振动及振动机理	97
3.2.2 CFRP 拉索参数振动起振条件分析	102
3.2.3 拉索参数振动模型的建立	103
3.2.4 数值计算实例及计算结果分析	105
3.2.5 制振措施探讨	108
3.2.6 小结	111
3.3 CFRP 拉索斜拉桥的几何非线性静力分析	112
3.3.1 几何非线性计算概述	112
3.3.2 斜拉桥几何非线性的影响因素及其分析方法	114
3.3.3 合理成桥状态确定	118
3.3.4 几何非线性各因素的影响量分析	122
3.3.5 CFRP 索斜拉桥和钢索斜拉桥的静力性能对比分析	125
3.3.6 小结	129
3.4 CFRP 拉索斜拉桥的动力特性及参数分析	130
3.4.1 斜拉桥动力问题	130
3.4.2 斜拉桥的动力分析模型	132
3.4.3 CFRP 拉索斜拉桥与钢拉索斜拉桥动力特性的比较	135
3.4.4 CFRP 拉索斜拉桥动力特性的影响参数分析	140
3.4.5 小结	145



3.5 CFRP 拉索试验桥研究	146
3.5.1 试验桥介绍	147
3.5.2 试验桥设计	148
3.5.3 CFRP 拉索的制作及安装	152
3.5.4 CFRP 拉索张拉及测试	154
3.5.5 小结	161
3.6 超大跨 CFRP 拉索斜拉桥的应用展望	161
3.6.1 概述	161
3.6.2 斜拉桥向超大跨发展的制约因素	162
3.6.3 超大跨 CFRP 索斜拉桥设计中建议采取的技术措施	165
3.6.4 CFRP 拉索斜拉桥的经济指标简评	167
3.6.5 CFRP 拉索斜拉桥在我国跨海工程上的应用前景	167
本章参考文献	168

第 4 章 CFRP 索悬索桥设计研究

4.1 CFRP 缆索悬索桥的缆索线形及内力研究	172
4.1.1 概述	172
4.1.2 成桥状态计算方法	173
4.1.3 空缆状态计算方法	189
4.1.4 主索鞍的设计参数及鞍槽内主缆成桥线形的计算方法	193
4.1.5 小结	198
4.2 CFRP 缆索悬索桥静力性能分析	199
4.2.1 CFRP 缆索悬索桥的极限跨径分析	199
4.2.2 CFRP 主缆与钢主缆截面积的计算与比较	202
4.2.3 CFRP(钢)缆索悬索桥承载效率的计算与比较	204
4.2.4 CFRP 主缆有效弹性模量	205
4.2.5 CFRP 缆索悬索桥重力刚度分析	207
4.2.6 CFRP 缆索悬索桥静力分析	214

4.2.7	CFRP(钢)缆索悬索桥静力性能的数值分析与比较	217
4.2.8	CFRP 缆索悬索桥静力性能的参数分析	230
4.2.9	改善 CFRP 缆索悬索桥静力性能的措施探讨	247
4.2.10	小结	247
4.3	CFRP 缆索悬索桥自振特性分析	248
4.3.1	概述	248
4.3.2	基于基频估算对 CFRP 缆索悬索桥自振特性的定性分析	249
4.3.3	CFRP 缆索悬索桥自振特性分析的有限元法	253
4.3.4	CFRP(钢)缆索悬索桥自振特性的计算实例分析与比较	256
4.3.5	CFRP 缆索悬索桥自振特性的参数分析	262
4.3.6	考虑动力性能,合理选取 CFRP 缆索悬索桥设计参数的基本原则	268
4.3.7	小结	269
4.4	实际工程设计与若干关键技术研究	269
4.4.1	南京六合白果桥——混凝土自锚式悬索桥工程设计简介	270
4.4.2	钢-CFRP 混合主缆参数的计算方法	273
4.4.3	白果桥静力性能及自振特性分析	274
4.4.4	白果桥地震反应比较分析	278
4.4.5	主缆、吊索含 CFRP 时的制作工艺要求	280
4.4.6	小结	281
4.5	CFRP 缆索悬索桥抗风性能的探讨	282
4.5.1	风对大跨悬索桥的作用	282
4.5.2	大跨悬索桥抗风性能分析方法及研究现状	283
4.5.3	悬索桥横向静风位移和内力的简化计算	285
4.5.4	CFRP(钢)缆索悬索桥横向静阵风响应的有限元分析与比较	287
4.5.5	CFRP 缆索悬索桥抗风稳定性的探讨	291
4.5.6	小结	296
	本章参考文献	296

第5章 CFRP 束体外预应力混凝土梁设计研究与应用

5.1 CFRP 作体外预应力束分析	301
5.1.1 体外预应力桥梁发展	301
5.1.2 温度膨胀系数问题	303
5.1.3 弯折对 CFRP 束的影响	305
5.1.4 CFRP 束的控制应力取值	306
5.1.5 预应力损失分析	306
5.1.6 适用的环境温度及预防破坏措施	311
5.1.7 小结	312
5.2 CFRP 束体外预应力梁桥正常使用状态分析方法研究	312
5.2.1 CFRP 束体外预应力混凝土梁桥的结构特点	312
5.2.2 能量法分析原理	313
5.2.3 设置多个转向块情况下梁的受力分析	319
5.2.4 梁跨中局部区段设体外预应力束梁的分析	330
5.2.5 张拉阶段梁的受力分析	338
5.2.6 小结	339
5.3 CFRP 束体外预应力梁桥正常使用状态影响因素分析	339
5.3.1 CFRP 束混凝土梁的配筋方式及有效截面惯性矩	339
5.3.2 体外束布置方式及其材性的影响	344
5.3.3 梁体尺寸及混凝土材性的影响	347
5.3.4 荷载量值及形式的影响	349
5.3.5 二次效应影响分析	351
5.3.6 转向块摩擦影响分析	352
5.3.7 小结	353
5.4 CFRP 束体外预应力梁桥受弯承载能力极限状态分析方法研究	353
5.4.1 受弯承载能力研究	354
5.4.2 CFRP 束体外预应力梁受弯承载力极限状态的分析思路	360

5.4.3	梁控制截面平衡方程	361
5.4.4	梁的等效塑性铰区	373
5.4.5	梁体变形曲线及能量方程	378
5.4.6	设置多个转向块时梁的受力分析	380
5.4.7	梁跨中局部区段设体外预应力束的分析	388
5.4.8	不设转向块及单转向块情况的分析	393
5.4.9	小结	397
5.5	CFRP 束体外预应力梁桥受弯承载能力极限状态影响因素分析	397
5.5.1	等效塑性铰区长度的确定	398
5.5.2	梁体内设普通钢筋时的受弯承载能力极限状态影响因素分析	430
5.5.3	梁体内设 CFRP 束时的受弯承载能力极限状态影响因素分析	438
5.5.4	受弯承载能力极限状态实用计算	446
5.5.5	小结	451
5.6	CFRP 束体外预应力梁桥的设计与施工	452
5.6.1	何圩桥的设计	453
5.6.2	标准跨径 25 m 的 II 梁设计	456
5.6.3	标准跨径 30 m 梁体内设 CFRP 束的 II 梁设计	458
5.6.4	何圩桥的施工工艺	458
5.6.5	设计中应注意的问题及设计步骤	462
5.6.6	施工中应注意的问题	464
5.6.7	小结	465
5.7	CFRP 束体外预应力梁桥试验研究	466
5.7.1	模型梁试验	466
5.7.2	碳绞线预应力损失监测与分析	469
5.7.3	张拉施工过程中梁体应变及变形的观测	474
5.7.4	二期恒载试验	481
5.7.5	小结	482
	本章参考文献	482
	附录:符号	488

第 1 章 FRP 材料性能

1.1 概 述

在过去 50 多年的工程建设中,常见的是混凝土结构、钢结构以及钢-混凝土组合结构。这些结构都有着各自的优势,但在工程实践中也暴露出一些问题,最突出的问题是,由于钢筋或钢材的锈蚀引起结构过早退化或结构功能不足。在美国,已确认有 40% 以上的桥梁属结构耐久性不足或功能退化。目前,发达国家基本建设的重点已经从大规模新建转向旧基础设施的维修加固,而我国正处在新建与维修并重的阶段,这就要求尽快研究经济有效的结构增强方法和新型的高性能结构材料,以延长结构使用寿命、提高结构性能。

近年来,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,简称 FRP)已经成为解决上述结构问题的一种可行途径。FRP 从 20 世纪 40 年代问世以来,在航空、船舶、汽车、化工、医学和机械等工业领域得到了广泛应用,如空中客车 A380 上共用碳纤维等复合材料约 22%,约为 36 t。FRP 具有轻质、高强度、耐腐蚀等优良性能,目前已成为土木工程的一种新型结构材料,并给土木工程领域带来许多新的发展契机。FRP 可用于建筑、桥梁、地下工程、隧道、港口码头等各种土木工程,不仅可以用于既有结构的加固补强,而且可以用于新建结构中,因而具有广阔的应用空间^[1~4]。

1.1.1 FRP 的组成

FRP 是一种复合材料,主要由纤维丝、树脂以及添加剂等成分组成,它们是影响 FRP 的物理、化学及力学性能的主要因素。

(1) 纤维丝

FRP 是由多股连续纤维通过基底材料胶合后,再经过特制的模具挤压、拉拔而成型的。纤维在 FRP 中起加劲作用,是受力主体。纤维材料多种多样,有碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维、聚乙烯纤维、硼纤维等。其中,碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维是应用最广泛的 3 种纤维。

① 碳纤维(Carbon Fiber)。碳纤维通常由有机纤维在惰性气体中经高温碳化而成,按

原丝类型主要分为聚丙烯腈基(PAN基)和沥青基两类^[12]。PAN基碳纤维是由丙烯腈单体聚合而成的一种合成纤维,它不但强度高,弹性模量也比较高,是当前发展最快、产量最高、技术最成熟的产品;沥青基碳纤维由聚氯乙烯沥青制成,其最大的特点是高弹性模量,而强度相对较低,它资源丰富,碳化收缩率高,是很有发展前途的产品。目前的碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)制品多数采用PAN基作为原丝。碳纤维的主要优点是轻质、高强度、高弹性模量、耐疲劳以及在潮湿环境和化学环境下具有优越的耐腐蚀性能;其主要缺点是极限延伸率相对较小。另外,碳纤维的传热和导电性能好。根据纤维强度和弹性模量的不同,碳纤维可分为4类^[13]:普通、高强度、高模量、极高模量,其主要力学性能如表1-1-1所示。

表 1-1-1 碳纤维主要力学性能

碳纤维 种类	相对密度 γ	拉伸强度 σ_b/GPa	弹性模量 E/GPa	极限延伸率 $\delta(\%)$	比强度 $\frac{\sigma_b}{\gamma}/\text{GPa}$	比模量 $\frac{E}{\gamma}/\text{GPa}$
普通	1.75	3.0	230	1.3	1.71	131
高强度	1.75	4.5	240	1.9	2.57	137
高模量	1.75	2.4	350	1.0	1.37	200
极高模量	2.15	2.2	690	0.5	1.02	321

② 芳纶纤维(Aramid Fiber)。芳纶纤维是人造有机纤维,由苯二甲酸和苯二胺化合而成。芳纶纤维除具有轻质、高强度、耐腐蚀、耐疲劳等优良性能外,还具有很好的受拉韧性,且其极限延伸率比碳纤维高,因此具有良好的抗冲击性能。但是,芳纶纤维的弹性模量和抗拉强度均比碳纤维的低,且其松弛率较大,尤其在潮湿环境中。此外,紫外线直接照射会降低芳纶纤维的力学性能。另外,芳纶纤维是低导电和非磁性的材料。

③ 玻璃纤维(Glass Fiber)。玻璃纤维是应用领域最广泛的一种纤维,其最大的用途是用于制造玻璃钢制品。E-glass和S-glass是应用较多的两种纤维,前者的强度和弹性模量较低,但价格也比较低廉;后者的强度较高,弹性模量和极限延伸率也大,并且耐酸性能好于E型玻璃纤维,但价格相对较高。玻璃纤维的最大优点是制造成本低,强度较高,绝缘性能好;缺点是弹性模量低,且在碱性环境、潮湿环境、长期荷载作用或循环荷载作用下性能有较大降低。

以上3种纤维的主要性能指标见表1-1-2。

表 1-1-2 各种纤维的主要性能

性 能	碳纤维	芳纶纤维	玻璃纤维
抗拉强度/MPa	$\approx 4\,410$	$\approx 2\,840$	$\approx 2\,350$
弹性模量/MPa	$\approx 2.3 \times 10^5$	$\approx 1.09 \times 10^5$	$\approx 6.9 \times 10^4$
极限延伸率(%)	≈ 1.9	≈ 2.4	≈ 4.0
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\approx 1.8 \times 10^3$	$\approx 1.45 \times 10^3$	$\approx 2.54 \times 10^3$
导电率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\approx 5.0 \times 10^6$	$\approx 8.8 \times 10^{14}$	$\approx 1.0 \times 10^{15}$

(2) 树脂

FRP 的另一个重要组成部分是树脂。树脂主要起粘结和传递剪力的作用,将纤维丝结成整体,既能保护纤维免受机械破坏和化学腐蚀,又能使纤维整体受力,给纤维丝提供横向支撑。树脂有热固性树脂和热塑性树脂两大类。目前,大部分 FRP 中所使用的均为热固性树脂。最常用的是环氧树脂,也有的用聚乙烯树脂、聚酯树脂、聚酰胺树脂等。

环氧树脂分子中含有羟基、醚键和极为活泼的环氧基,能使与它接触的界面之间产生极性相互作用,因而与纤维的粘结性能很好,固化后的环氧树脂分子中含有稳定的苯环,结构稠密,化学稳定性好,能抵抗化学腐蚀和溶解;在固化过程中,无副产物产生,收缩率小。乙烯基树脂的耐碱最好,而聚酯树脂是不耐碱的。

(3) 添加剂

为改善树脂的物理和化学性能,通常在树脂基体中加入一些添加剂^[14]。如,加入稀释剂降低环氧树脂配方体系的黏度,改善其工艺性能;加入增韧剂提高树脂的韧性和抗冲击性;加入填料降低胶体的收缩率和耐热性能;加入某些偶联剂可改善树脂的耐湿热老化性能。

1.1.2 FRP 产品形式与生产工艺

FRP 是高强纤维和树脂的复合材料,按制作工艺可分为片材、型材、筋材。

(1) FRP 片材

FRP 片材包括 FRP 布和 FRP 板,如图 1-1-1 所示。FRP 布是目前结构工程中应用最广泛的 FRP 制品,它是由连续的长纤维编织而成,通常是单向纤维布,且使用前不浸润树脂,施工时用树脂浸润粘贴,主要用于结构的加固,也可用作生产其他 FRP 制品的原料。FRP 板是将纤维在工厂经过平铺、浸润树脂、固化成型制成,施工中再用树脂粘贴。FRP 布一般只能承受单向拉伸作用;FRP 板可以承受纤维方向的拉压作用,但在垂直纤维方向的强度和弹性模量很低。

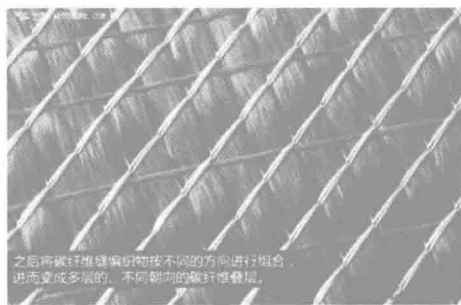


图 1-1-1 FRP 片材

(2) FRP 筋材

FRP 筋材包括 FRP 索和 FRP 筋,如图 1-1-2 所示。FRP 索是将连续的长纤维单向编织成绳索状,再用树脂浸润固化制成,其外形可分为绞线状和发辫状。目前,商品化的碳绞线有 1 股、7 股、19 股和 37 股 4 种形式,直径由 3 mm 变化至 40 mm。由于 FRP 索编织成绳索状,碳绞线的柔韧性较好,可以盘圆包装,易于运输、处理及安装。FRP 筋是将连续纤



维丝通过基底材料进行浸渍胶合后,经拉挤成型技术和必要的表面处理而制成,其外形可分为光圆状和变形状。

为提高筋材的粘结性能,常采用以下方法对拉挤筋材进行二次表面加工:

- ① 固化前,在筋材上缠绕螺旋形纤维束。
- ② 在筋材上缠织纤维丝条带形成凹凸。
- ③ 在筋材表面覆以颗粒物或短纤维。
- ④ 让筋材通过具有凹凸内表面的模头形成凹凸。
- ⑤ 用机械法直接在筋材表面进行加工,压制出波纹。

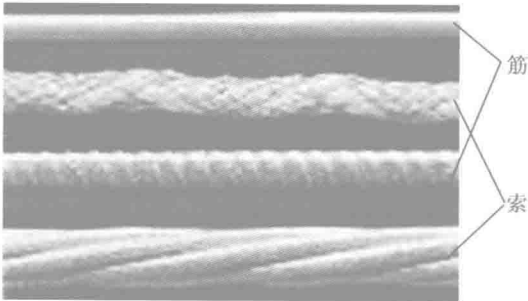


图 1-1-2 FRP 筋材

一般来说,纤维含量越高,FRP 筋强度越高,但挤拉成型愈困难,典型的 FRP 筋纤维体积百分比为 60%~65%。FRP 筋材可用于混凝土中代替普通钢筋,也可用作预应力筋。各种 FRP 筋与钢筋、钢绞线的性能对比见表 1-1-3^[15]。

表 1-1-3 各种 FRP 筋与钢筋、钢绞线的性能对比

材料特性 \ 材料种类	CFRP 筋	AFRP 筋	GFRP 筋	普通钢筋	钢绞线
密度/(kg·m ⁻³)	1.5×10 ³ ~ 1.6×10 ³	1.25×10 ³ ~ 1.4×10 ³	1.5×10 ³ ~ 2.0×10 ³	7.85×10 ³	7.85×10 ³
抗拉极限强度/MPa	1 600~2 600	1 200~2 100	600~1 700	370~600	1 730~2 190
屈服强度/MPa	—	—	—	235~400	1 470~1 860
受拉弹性模量/MPa	147~165	49~125	42~56	200	195
极限延伸率(%)	1.0~1.6	1.9~4.4	1.2~3.1	>10.0	>4.0
轴向温度膨胀系数/℃ ⁻¹	0.68	-6.0~-2.0	8.0~10.0	12	12
横向温度膨胀系数/℃ ⁻¹	2.5×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁵	2.3×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁵
应力松弛率(%)	2~3	7~15	10	—	3

注:碳纤维增强复合材料(简称 CFRP),芳纶纤维增强复合材料(简称 AFRP),玻璃纤维增强复合材料(简称 GFRP)。

(3) FRP 型材

FRP 型材包括格栅型、管型、蜂窝型等,如图 1-1-3 所示。FRP 格栅是将长纤维束按照一定的间距相互垂直交叉编织,再用树脂浸润固化而成,包括 FRP 平面格栅和 FRP 立体格栅。FRP 格栅可以用于代替钢筋网片或钢筋笼。FRP 管是将连续纤维束或纤维织物浸渍树脂后,按照一定的规律缠绕到芯模(或衬胆)表面,再经固化而成。FRP 管可以承受很大的内压,可直接用作管道,也可在管内填充混凝土用作柱、桩,甚至梁等。FRP 蜂窝板由上下面的 FRP 板和夹心材料组成,故也称作夹心板,它充分利用了面层 FRP 材料强度,有很高

的强度重量比和刚度重量比。FRP 蜂窝板的生产成型方法主要有一次成型法和二次成型法。一次成型法又有真空树脂传递模塑法和手糊法两种工艺,二次成型主要是采用型材粘结。FRP 夹心板目前在桥梁工程中主要用于制作 FRP 桥面板。

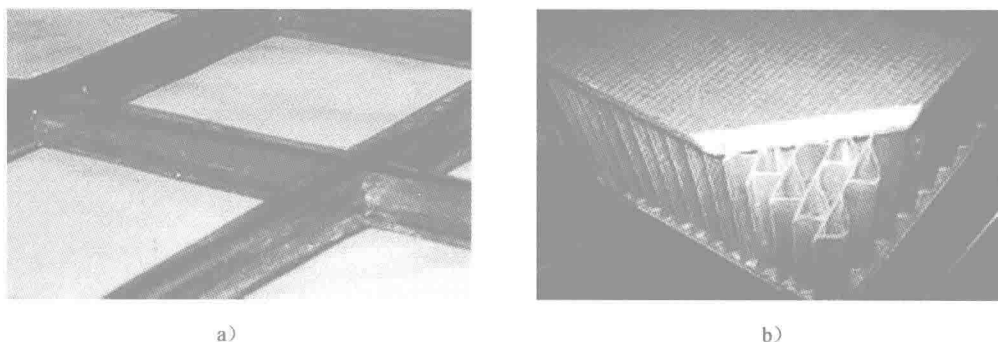


图 1-1-3 FRP 型材
a) FRP 格栅;b) 蜂窝式 FRP 板

1.1.3 FRP 的特点

(1) FRP 的优点

① 轻质,高强度。FRP 顺纤维向抗拉强度高,FRP 筋材的强度一般为 $900 \sim 2400 \text{ MPa}$,而其密度很小,仅为钢材的 $1/5 \sim 1/4$,因而具有很高的比强度。采用 FRP 可大大减轻结构自重,方便施工。在桥梁工程中,采用 FRP 结构或 FRP 组合结构作为上部结构可显著提高桥梁的承载效率和跨越能力。悬索桥的跨越能力最大,理论上,用传统材料建造的悬索桥极限跨度在 5000 m 以内,而 FRP 悬索桥的极限跨度在 8000 m 以上。

② 耐腐蚀。FRP 具有良好的耐腐蚀性,可以在酸、碱、氯盐和潮湿的环境中抵抗化学腐蚀,这是传统结构材料难以相比的。目前,在化工建筑、地下工程和水下特殊工程中,FRP 耐腐蚀的优点已经得到实际工程的证明。一些国家的寒冷地区和近海地区已经开始在桥梁、建筑中采用 FRP 结构替代传统结构,以抵抗冰盐和大气中氯离子的腐蚀,使得结构的维护费用大大降低。

③ 可设计性好。FRP 是一种人工复合材料,其性能可根据需要进行设计,通过使用不同的纤维种类、控制纤维的含量和铺设不同的方向,可设计出各种强度和弹性模量的 FRP 制品。如,由玻璃纤维芯和碳纤维表层制作成 FRP 筋材和管材,以及在受力大的部位涂敷 CFRP 层的 GFRP 型材等。此外,FRP 产品成型方便,其形状可根据需要灵活设计。

④ 耐疲劳、减振性能好。FRP 筋的疲劳性能显著优于钢筋,其自振频率较高,可避免早期共振;同时,其内阻也较大,一旦激起振动,衰减也快,因而特别适用于易产生振动疲劳破坏的构件或结构中,如用作斜拉索、体外索、吊索等。