

FRP 在工程结构中的应用与发展

叶列平 冯 鹏

(清华大学, 北京 100084)

摘 要: FRP (纤维增强复合材料) 近年来在混凝土结构加固中得到广泛的应用, 并作为一种新型高性能结构材料受到结构工程界的广泛关注, 国内外有关研究和工程单位开展了大量的研究和实践应用。本文介绍了结构工程中常用的 FRP 材料性能和形式, 分析了其优点与不足, 并介绍了 FRP 加固结构、FRP 配筋和预应力 FRP 钢筋混凝土结构、FRP 结构与 FRP 组合结构以及 FRP 在桥梁结构、大跨空间结构和智能结构中的应用与发展, 以期促进我国土建结构工程中对这一新型高性能材料应用和研究工作的开展。

关键词: 纤维增强复合材料; 混凝土; 结构加固; 组合结构; 桥梁; 大跨结构; 智能结构

中图分类号: TU-53 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2006) 03-0024-13

Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures

Ye Lieping Feng Peng

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, FRP (fiber-reinforced polymer/plastic) has been widely utilized for strengthening concrete structures due to its high tensile property. FRP has attracted much attention by the civil and construction industry since it is considered as a new type of high performance structural material. Many research works and actual applications of FRP to civil structures were carried out by both domestic and international organizations. In this paper, an introduction is given on the properties and different forms of FRP frequently used for structural applications, including the statements on the advantages and drawbacks of the material. Moreover, a brief review is given on the application and future development of FRP used for strengthening structures, FRP reinforcements and prestressed tendons for concrete structures, FRP composite structures and other FRP structures, such as bridges, large-span structures and intelligent structures. This paper is mainly aimed at promoting future research and application of FRP for civil structures in China.

Keywords: fiber-reinforced polymer/plastic; concrete; structural strengthening; composite structures; bridges; large-span structure; intelligent structure

E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn

概 述

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广泛的应用。近年来, FRP 以其高强度、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) 和芳纶纤维 (aramid fiber) 增强的树脂基体, 分别简称为 GFRP、CFRP

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50238030)、国家“863”计划项目 (2001AA336010)

作者简介: 叶列平, 博士, 教授

收稿日期: 2003-06-01; 收到修改稿日期: 2005-04-08 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

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 10 m，宽 1.5 m^[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 FRP 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 20 世纪 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 44 m 的球形 GFRP 雷达天线罩^[4]；1982 年在北京密云建成一座跨径 20.7 m 的 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），在工程结构中的应用越来越多。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，也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学科研究热点。本文对 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 材料在我国结构工程领域应用和研究工作的开展。

1 FRP 材料

1.1 纤维与树脂

FRP 的材料性能与钢材和混凝土等传统结构材料有很大的不同，其制品形式也多种多样。纤维是 FRP 中的主要受力材料，可分为长纤维和短纤维，工程结

构中使用的 FRP 以长纤维增强为主。表 1 中列出了常用纤维的主要力学性能及其与钢材和铝的对比^[1,5]，可见纤维材料的比强度（拉伸强度/比重）为钢材的 20~50 倍，高强轻质性能十分突出；碳纤维的比模量（拉伸模量/比重）为钢材的 5~10 倍，芳纶纤维的比模量为钢材的 2~3 倍，玻璃纤维的比模量与钢材相当。单从比强度和比模量来看，实际工程以碳纤维材料应用效果最佳，但碳纤维材料的延伸率很小，因此有时需要配合其他纤维混合应用，以取得更佳的综合性能。

表 1 代表性纤维轴向力学性能参数与钢、铝的比较
Table1 Axial mechanical parameters of typical fibers in comparison with steel and aluminum

材料种类		拉伸	弹性	热胀	延伸	比强度	比模量	
		强度	模量	系数				
		(GPa)	(GPa)	(10 ⁻⁶)	率(%)	(GPa)	(GPa)	
玻璃 纤维	E	2.55	3.5	74	5.0	4.8	1.37	29
	SR	2.49	4.9	84	2.9	5.7	1.97	34
	M	2.89	3.5	110	5.7	3.2	1.21	38
	AR	2.70	3.2	73.1	6.5	4.4	1.19	27
	C	2.52	3.3	68.9	6.3	4.8	1.31	27
碳 纤 维	标准型 (T300)	1.75	3.5	235	-0.41	1.5	2.00	134
	高强型 (T800H)	1.81	5.6	300	-0.56	1.7	3.09	166
	高模型 (M50J)	1.88	4.0	485	-0.6	0.8	2.13	213
	极高模型 (P120)	2.18	2.2	830	-1.4	0.3	1.01	381
芳 纶 纤 维	Kelvar 49	1.44	3.6	125	-2.0	2.5	2.50	87
	Kelvar 149	1.45	2.9	165	-3.6	1.3	2.00	114
	HM-50	1.39	3.1	77	-1.0	4.2	2.23	55
钢	HRB400 钢筋	7.8	0.42	206	12	18	0.05	26
	高强度绞线	7.8	1.86	200	12	3.5	0.24	26
铝		2.7	0.63	74	22	3.0	0.23	27

树脂基体的作用主要是将纤维粘接在一起，使纤维受力均匀，并形成所需要的制品或构件形状。表 2 中列出了一些具有代表性树脂的性能指标^[1,5]。

表 2 代表性树脂基体的性能参数
Table2 Properties of typical resin matrices

名称	热变形 温度 ()	拉伸 强度 (MPa)	延伸 率 (%)	压缩 强度 (MPa)	弯曲 强度 (MPa)	弯曲 模量 (GPa)
环氧树脂	50~121	98~210	4	210~260	140~210	2.1
不饱和聚酯树脂	80~180	42~91	5	91~250	59~162	2.1~4.2
乙烯基树脂	137~155	59~85	2.1~4	-	112~139	3.8~4.1
酚醛树脂	120~151	45~70	0.4~0.8	154~252	59~84	5.6~12

1.2 FRP 的制备工艺与产品形式

制备成型是保证 FRP 中纤维和基体共同工作的前提。FRP 的力学性能对制备工艺的依赖性很强，因此在 FRP 结构的设计中必须考虑制备工艺。不同制备工艺得到的产品形式也有较大的差别。在结构工程中应用的 FRP 的产品形式主要有：片材、纤维布和

板)、筋材和索材、网格材和格栅、拉挤型材、缠绕型材、模压型材及手糊制品等^[6]。

纤维布是目前应用最为广泛的形式。它由连续的长纤维编织而成，通常是单向纤维布，使用前不浸润树脂。目前纤维布主要应用于结构工程加固，用树脂浸润后粘贴于结构表面。FRP板是将纤维在工厂中经过层铺、浸润树脂、固化预成型而制成，施工中将其粘贴或机械锚固于结构表面。纤维布一般只能承受单向拉伸，FRP板可以承受纤维方向上的拉和压，它们在垂直纤维方向上强度和弹性模量均很低。

FRP筋是采用单向成型工艺(如拉挤)，将单向长纤维与树脂混合成型为棒材，可对其表面进行处理，以增强其与混凝土的粘结。FRP索是将连续的长纤维单向编织，再用少量树脂浸润固化或不用树脂固化而制成的绳索状FRP制品。FRP筋材和索材可在钢筋混凝土结构中代替钢筋和预应力筋，还可用于大跨索支撑结构、张拉结构和悬索结构。

将长纤维束按照一定的间距相互垂直交叉编织，再用树脂浸润固化可形成FRP网格材或FRP格栅。FRP网格材可替代钢筋网片，三维的FRP网笼可替代钢筋笼。FRP格栅则可直接用于结构中作为楼面或制成夹心板等构件。

拉挤工艺是将纤维束或纤维织物通过纱架连续喂入，经过树脂胶槽将纤维浸渍，再穿过热成型模具后进入拉引机构，按此流程可制成连续的FRP制品。拉挤工艺可生产出截面形状复杂的连续型材，如图1所示。由于拉挤型材中纤维主要沿轴向，且纤维含量高，有很好的受力性能，可直接作为受力构件，也可以与其他材料组合受力。但拉挤型材的横向强度和剪切强度较低，一般在拉挤成型工艺中均需同时复合一定数量的毡，并且在应用中也需给予重视。

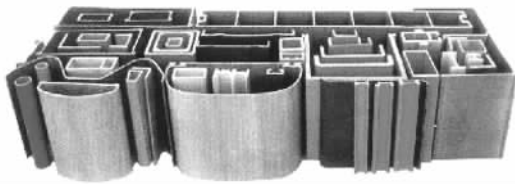


图 1 各种截面的 FRP 拉挤型材

Fig.1 FRP protruded profiles with arious sections

FRP缠绕型材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，再经过固化形成以环向纤维为主的型材，常见形式有管、罐、球等。缠绕型材也可获得较高的纤维含量，力学性能较好，可承受很大的内压，已广泛用于压力容器、管道。在工程结构中，FRP缠绕管内充填混凝土可作为柱、桩，甚至梁，构件性能可优于普通钢管

混凝土。

模压型材是将预浸树脂的纤维或织物放入模具中进行加热加压固化成型制成的FRP型材。可采用长纤维，也可以是短纤维或纤维织物。这种工艺生产出的型材尺寸准确、表面光洁、质量稳定，但通常纤维含量较低，力学性能较差。

对于一些尺寸较大或形状复杂的型材，一般采用常温低压接触成型工艺，即在室温低压或无压下用树脂将纤维和织物粘接成型的方法，以前都是人工操作完成，因此称为手糊。这种方法可生产出形状复杂、纤维铺陈方向任意、大尺寸的FRP产品，但产品质量不易稳定。但随着袋压法、真空法、喷射法等加压方法的应用，以及一些辅助设备的出现，使得手糊工艺的产品质量和工作效率大幅提高。目前在低压接触成型的基础上，又发展有树脂传递模塑(RTM)、喷射等工艺，可生产出性能和形式多样的FRP产品。

此外，还可以对FRP产品进行二次加工，将不同的FRP产品进行合理组合，或者将FRP制品与传统结构材料组合形成FRP组合结构，以满足工程要求。

1.3 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。本文作者提出的“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) 其它优势，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，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^[56,11]。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 500 元/m²左右，就是一个很好的例证。

2 工程结构加固补强

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，此后在湖南溆浦大江口桥、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处，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 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 板成功地加固了瑞士的 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。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^[19-22]。我国大陆 1998 年后才对 FRP 加固技术开展了一系列的研究, 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^[23]。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, 本文不再赘述, 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^[24-25]。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%^[26]。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。在我国的工程应用中, 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^[27]。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^[28], 还有一些高延伸率的材料应用, 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, 提高其抗弯承载力, 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: FRP 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; 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^[29]; FRP 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^[30]。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, 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, 提高其抗剪承载力。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^[31]。

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: 界面粘接性能和剥离、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、壳体接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^[33], 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^[33]、FRP 筋表面嵌入式加固技术^[34]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构件的加固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, 其中通过试验表明, 疲劳性能的提高非常显著^[35]。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以及直接作为构件、组合构件或结构, 其极限状态、设计方法和

可靠度问题, 以及设计指标都需重新考虑^[36,37]。

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、滚花或编织等工艺增强其与混凝土间的粘接力; 用作预应力 FRP 筋的索一般较柔软, 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^[36]以及配套的锚具, 并编制了相关的规范和规程^[16-40], 在桥梁结构和建筑结构中都得到了较多的应用。图 2 为国外工程中应用的实例。

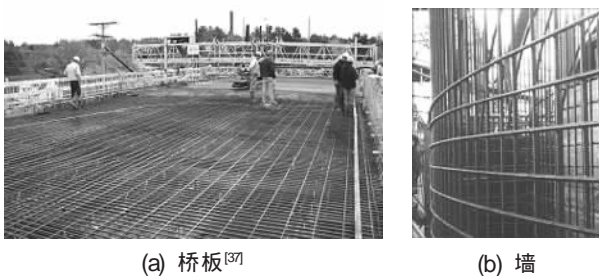


图 2 FRP 配筋混凝土在桥梁和建筑中的应用
Fig.2 FRP reinforced concrete applications in bridge and building

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接试验方法, 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 筋与混凝土间粘接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^[43]。

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的干湿交替的挡土墙、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, 因此构件的破坏带有一定的脆性, 因此在 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。

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 织物蒙皮结合的组成蒙皮结构。

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 3(a)为 1999 年在瑞士 Basel 建造的一座 FRP 框架结构的建筑^[45], 图 3(b)为一个强腐蚀性环境车间的 FRP 桁架屋盖。

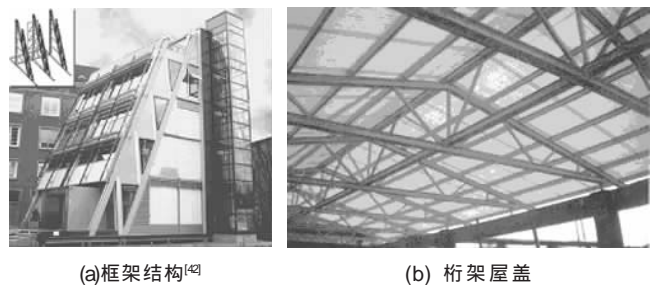


图 3 FRP 结构
Fig.3 FRP structures

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^[45], 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。

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^[44-48]，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。北京密云的 FRP 桥经过改造后成为 FRP- 混凝土组合箱梁桥，见图 4，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 10 m 的 FRP- 混凝土组合梁桥^[51]，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 4 世界上第一座 FRP 公路桥 (北京密云)

Fig.4 First FRP highway bridge in the world (Miyun, Beijing)

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^[51-59]。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。

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部分受力构件^[60]，如伦敦的 Covent 花卉市场中尝试性地用 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 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 1/5~1/4，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 5 为我国台湾生产的 CFRP 网架杆件。

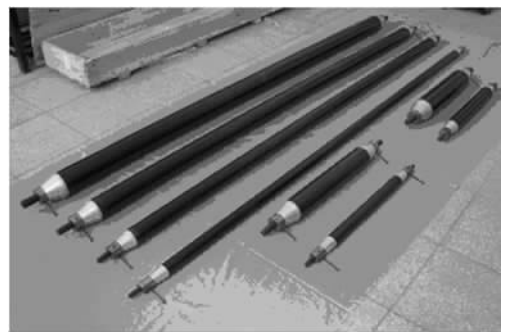


图 5 CFRP 网架杆

Fig.5 CFRP pipes for latticed space structure

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，成形成容易，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了极大的改善。图 6 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 44 m 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 60 m 跨的 FRP 双曲屋盖，获得了很好的建筑效果和使用效果。

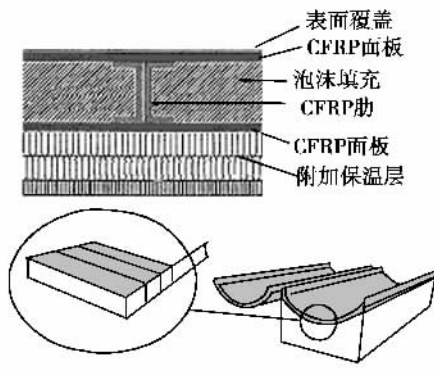


图 6 FRP 夹心板屋面

Fig.6 FRP sandwich roof

本文作者提出的 FRP 编织网结构体系也是一种新型的 FRP 大跨空间结构体系^[61]。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，能充分利用了 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 7 为一座采用 FRP 编织结构体系的大型体育场的模型图。

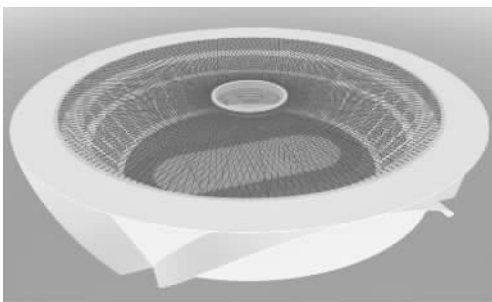


图 7 FRP 编织网结构

Fig.7 FRP woven web structures

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中的研究。

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 3），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。

表 3 早期的 FRP 桥梁 (1985 年以前)

Table3 FRP bridges in early days (before 1985)

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

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^[62]，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 50 m，主跨梁长 27.4 m，宽 4.4 m，箱梁自重 8.9 t（为钢梁的 30%，混凝土梁的 13%），GFRP 蜂窝夹心板组合箱梁，斜缆为高强度钢丝束，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^[46]。

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 113 m，主跨为 63 m，宽 2.2 m，双塔双索面斜拉体系，A 形桥塔，如图 8 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 5000 m 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 8 全 FRP 斜拉桥 (英国)

Fig.8 All FRP cable-stayed bridge (Aberfeldy UK)

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 40 t 卡车的可开启桥——Bond Mill 桥,桥长 8.22 m, 4.27 m 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 9 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 12.5 m,宽 1.5 m,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^[60]。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 10 所示的桥梁,为 2001 年在英国建成的一座轻型 FRP 人行桥^[64],跨度为 47 m,采用 GFRP 制成箱梁,用不锈钢吊索张拉成的悬索桥,具有很好的景观效果。2001 年在西班牙还建成了一座全 FRP 拱桥^[65],跨度为 38 m,全部采用 GFRP 型材,结构总重量为 19 t,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。



图 9 FRP 可开启桥 (英国)

Fig.9 FRP movable bridge (UK)



图 10 FRP 悬挂步行桥 (英国)

Fig.10 FRP suspension footbridge (UK)

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,改善桥梁的气动性能;(2) FRP 外壳耐腐蚀且封护系统的密封性好,阻止了外界环境对大桥主体结构的腐蚀;(3) FRP 外壳把结构包护在内部,桥体下部拱腹平滑流畅,并且有多种颜色可选,使整座桥外观简洁、美观。FRP 桥梁封护系统最早在 1987 年,由英国 Maunsell Structural Plastics 公司在 Tees Viaduct 的一座桥梁上尝试应用,获得了很好的效果。而后在英国许多桥梁中都开始使用这种封护系统,并编制了相应的规范^[63]。2002 年我国港湾工程第三航道局承建的泰国湄南河上的 Rama VIII 斜拉桥就采用了这种桥梁封护系统^[67],见图 11。



图 11 FRP 桥梁封护系统 (泰国)

Fig.11 FRP Enclosure of bridge (Thailand)



图 12 FRP 桥面体系 (美国 堪萨斯州)

Fig.12 FRP superstructure of bridge (KS, USA)

FRP 桥面体系是近十年内发展起来的一种新型桥面结构形式,一般为全 FRP 结构或 FRP-混凝土组合梁板。FRP 桥面板与传统的钢筋混凝土桥板相比有以下优势:(1) 工厂中加工成型,重量轻,运输安装迅速;(2) 能抵抗除冰盐、海水以及空气中氯离子的侵蚀,维护费用低;(3) 恒载小,可减少支撑结构和下部结构的荷载;(4) 为弹性结构,设计通常为挠度变形控制,偶尔超载变形可恢复;(5) 疲劳性能好。1996 年,美国 Kansas 州的无名沟壑上架起了第一座采用 FRP 桥面板的公路桥,如图 12 所示,桥净跨 6.48 m,宽 8.46 m,设计荷载等级 HS-20 级,现场施工只用了 8 小时^[68]。同年,美国加州大学圣地亚哥的研究者也将 FRP 桥板安放在公路上进行了现场试验。此后,FRP

桥面体系发展迅速，目前世界上已有近百座中小型桥梁采用，其中绝大部分在美国，Ohio 州甚至制订了 6 年内 100 座桥梁中应用 FRP 桥面板的计划，而我国目前还是空白。这些桥梁中大约 60% 为老旧桥梁的翻新，绝大部分为 GFRP 材料。

FRP 桥面体系从结构形式上可分为两种：一种是板式桥，即直接用 FRP 桥板实现跨越；另一种是梁式桥，将 FRP 桥面板搁置在钢梁或混凝土梁上，也可以用 FRP 梁或 FRP 组合梁。在应用方式上，可以直接用 FRP 桥面体系建造新桥；也可以用于老桥的修复，即将原混凝土桥板用 FRP 桥面板替换，一方面可减轻结构自重，甚至可提高荷载等级，另一方面增强了桥梁结构的耐腐蚀性。FRP 桥面体系的构造形式多样，本文将各种 FRP 桥面体系分为五大类，如表 4 所示。

表 4 FRP 桥面体系的分类
Table 4 Classification of FRP bridge superstrures

构造	加工装配方法	
FRP 夹心板 FRP sandwich deck	手糊及机械辅助 RTM	
FRP 标准型材拼装板 Assembled modular FRP profiles deck	榫接和销接 螺栓连接 粘接 预应力挤压连接 以上方式同时使用	
FRP 面板-型材芯组合板 Combining FRP skin-plates and core profiles deck	型材芯 面板	拉挤成型 纤维缠绕 拉挤成型 手糊或层铺
其他全 FRP 上部结构	手糊箱形梁 拉挤型材梁 组合拉挤型材梁	
FRP-混凝土(木材) 组合梁、板	FRP-concrete/gulam hybrid deck	

为了推动 FRP 在我国结构工程中的合理应用，清华大学从 2004 年研发了一种新型外部缠绕 FRP 空心桥面板，见图 13，并对其性能进行了深入研究^[6]。该桥面板适用于梁式桥的桥面结构或跨度在 4 m 以下的跨越，与其它 FRP 空心板相比，HD 板材料的利用率更高，受力性能更好。



图 13 FRP 桥面板: HD 板
Fig.13 FRP bridge deck: HD deck

4.5 FRP 与工程结构的安全自监测

由于 CFRP 不仅有较高的强度和弹性模量，而且有很好的导电性能。当纤维受力时，CFRP 纤维方向

上的电阻和横向的电阻随着荷载大小会发生可逆变化，即压敏特性；而一旦发生破坏，电阻则会发生不可逆的变化。利用这一特征，可以直接通过 CFRP 结构各部位的电阻值变化来监测结构的工作状态，成为具有自监测功能的智能结构材料。也可以将 CFRP 筋作为传感元件埋入混凝土，或在 CFRP 布加固混凝土结构时利用 CFRP 布作为传感元件，对混凝土结构进行监测^[69,70]。值得注意的是它们不单纯是传感器，还能为结构提供承载力。图 14 为清华大学进行 CFRP 布加固钢筋混凝土梁受弯加固试验时获得的荷载-挠度关系与 CFRP 电阻变化-挠度关系。可以看出，荷载不大时，CFRP 电阻值随变形增加呈减小趋势，而当钢筋屈服、梁的挠度显著增大时，CFRP 布的电阻值增加，且变化明显。

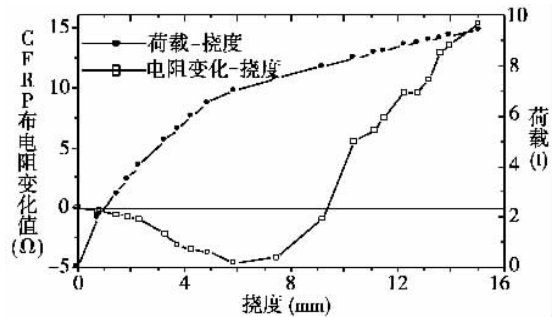


图 14 CFRP 加固混凝土梁中
CFRP 电阻变化值-挠度、荷载-挠度关系曲线
Fig.14 CFRP resistance change-deflection curve and load-deflection curve in CFRP strengthened RC beam

还有研究者进行了试验研究，表明 CFRP 的电阻变化率与拉应变基本呈线性关系，其灵敏系数约为 30.5~134.1，约为普通电阻应变片的 13.8~60.7 倍，CFRP 的应变可以通过测量其电阻变化值来获得^[71]。还有一种利用碳纤维的导电性进行自监测的形式是将短碳纤维与混凝土混合制成的碳纤维混凝土，这样就能形成一种压力自感知的智能结构材料^[72]。

如果将光纤光栅作为一股纤维束放入合束盘正中，与 FRP 一起拉挤成型，就能将光纤传感器埋入结构内部进行健康监测。这个概念最早由 Kalamkarov 提出，并对其进行了传感特性、疲劳特性、抗腐蚀性等研究^[73]。我国的研究者^[71]也设计制作了 2 种 FRP 筋材，进行了重复荷载的试验研究，通过微观观察看到 FRP 筋与光栅界面结合良好，可以保证它们变形协调。这样的 FRP 筋具有更加稳定的自监测性能，更适合在结构中多参数的分布式测量。

5 结 语

本文介绍了 FRP 这一高性能新型结构材料的特

点和在土木与建筑工程结构中的发展及应用情况。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, 对这种高性能材料开展了大量研究, 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。希望通过本文, 使工程师们对 FRP 材料有更多的认识, 在未来的几年里我国在 FRP 材料研究和应用方面能有较快的发展, 提升我国土木和建筑结构的水平。

参 考 文 献

[1] 沈观林. 复合材料力学 [M] . 北京: 清华大学出版社, 1996

[2] Halliwell S. In-service performance of glass reinforced plastic composites in building [J] . Proc. the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 2004, 157 (1) : 99- 104

[3] 蔡国宏. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景 [EB/OL] // 中国交通, 2000, http://www.iicc.ac.cn/jiaotongkj/gaoxinjs/t20040210_8793.htm

[4] 沃丁柱. 复合材料大全 [M] . 北京: 化学工业出版社, 2000

[5] 邹祖诤. 复合材料的结构与性能 [M] // 材料科学与技术丛书 (第 13 卷). 吴人浩等译. 北京: 科学出版社, 1999

[6] 冯鹏. 新型 FRP 空心桥面板的设计开发与受力性能研究 [D] . 北京: 清华大学工学博士学位论文, 2004

[7] 杨允表, 石洞. 复合材料在桥梁工程中的应用 [J] . 桥梁建筑, 1997, (4) : 1- 4

[8] Maeda K, Ikeda T, Nakamura H, et al. Feasibility of ultra long-span suspension bridges made of all plastics [C/CD] // Proc. IABSE Symposium Melbourne, Australia IABSE, 2002

[9] Feng P, Ye L P, Bao R, et al. A large-span woven web suspension roof system made of high-strength FRP [C/CD] // Proc. IABSE Symposium: Metropolitan Habitats and Infrastructure, Shanghai [s.n] , 2004

[10] 洪乃丰. 钢筋混凝土基础设施腐蚀与耐久性 [M] // 陈肇元. 土建结构工程的安全性及耐久性. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 76- 83

[11] Demers C E. Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites [J] . Construction and Building Materials, 1998, 12 (5) : 311- 318

[12] Karbhari V M. Durability of FRP composites in civil infrastructure-myth or reality [C] // Proc. the International

Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001: 1489- 1496

[13] Sen R. Durability of advanced composites in a marine environment [Q] // Proc. the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001:1509- 1516

[14] David, E Neuner J D. Environmental durability studies for FRP systems: definition of normal conditions of use of FRP for structural strengthening applications [Q] // Proc.the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001: 1551- 1558

[15] Nystrom H E, Watkins S E, Nanni A, et al. Financial viability of fiber-reinforced polymer (FRP) bridges [J] . Journal of Management in Engineering, ASCE, 2003, 19 (1) : 2- 8

[16] 曾宪桃, 车惠民. 复合材料 FRP 在桥梁工程中的应用及其前景 [J] . 桥梁建设, 2000, (2) : 66- 70

[17] Meier U, Stöcklin I, Terrasi G P. Making better use of the strength of advanced material in structural engineering [Q] // Proc. the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001: 41- 48

[18] Karbhari V M. Durability of FRP composites in civil infrastructure-myth or reality [Q] // Proc. the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001:1489- 1496

[19] The Japan Building Disaster Prevention Association. Seismic retrofit design and construction guidelines for existing reinforced concrete buildings and steel encased reinforced concrete buildings using continuous fiber reinforced material [S]

[20] American Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, reported by ACI Committee 440 [S]

[21] CEB-FIP. Externally bonded FRP reinforcement for RC structure, Technical report on the design and use of externally bonded fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structure prepared by a working party of the Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structure [S]

[22] ISIS CANADA. Strengthening reinforcement concrete structures with externally-bonded fiber reinforced polymers, Design Manual No.4 [S]

[23] 中国工程建设标准化协会. 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程 [S]

[24] 叶列平. 碳纤维加固混凝土柱受剪承载力的计算 [J] . 建筑结构学报, 2000, 21 (2) : 59- 67

[25] 赵树红, 叶列平. 碳纤维布对混凝土柱抗震加固的试验

- 分析 [J]. 建筑结构, 2001, 31 (12) :17-19
- [26] 陆新征, 冯鹏, 叶列平. 纤维布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (2) :46-51
- [27] 胡伟红. FRP 约束钢筋混凝土圆柱抗震性能研究 [D]. 北京: 清华大学工学硕士学位论文, 2004
- [28] 熊光晶, 等. 混杂纤维复合材料及其在混凝土梁柱加固中的应用研究 [J]. 建筑结构, 2001, 31 (9) :11-13
- [29] 叶列平, 崔卫, 胡孔国, 岳清瑞. 碳纤维布加固钢筋混凝土构件正截面受弯承载力分析与计算 [J]. 建筑结构, 2001, 31 (3) :3-5
- [30] 沙吾列提·拜开依, 叶列平, 杨勇新, 庄江波. 预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁的施工技术 [J]. 施工技术, 2004, 33 (6) :23-24
- [31] 陆新征. FRP 与混凝土的界面行为研究 [D]. 北京: 清华大学工学博士学位论文, 2004
- [32] 杨涛. 核电厂安全壳结构模型碳纤维加固试验研究 [D]. 冶金建筑研究总院硕士论文, 2003
- [33] 曹锐. NEFMAC 加固钢筋混凝土板的试验性能研究与理论计算 [D]. 北京: 冶金建筑研究总院硕士论文, 2002
- [34] De Lorenzis L, Nanni A, La Tegola A. Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods [C] // Proc. 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures, 2000:521-528
- [35] 张宁. 碳纤维布加固修复钢结构粘结界面受力性能试验研究 [D]. 北京: 冶金建筑研究总院硕士论文, 2004
- [36] 叶列平. FRP 加固混凝土结构设计方法 [C] // 第二届纤维增强塑料及工程应用学术交流会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002: 67-73
- [37] Feng P, Ye L P. Review and new proposals for performance indices of flexural members [C] // Proc. 8th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Science Press, 2004: 121-130
- [38] Dolan C W, Hamilton III H R, Bakis C E, et al. Design recommendations for concrete structures prestressed with FRP tendons [R] // FHWA CONTRACT Report. DTFH61-96-C-00019, 2001
- [39] American Concrete Institution. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars [S]. ACI 440.1R-01. ACI Committee 440, 2001
- [40] Sonobe Y, Fukuyama H, Okamoto T, et al. Design guidelines of FRP reinforced concrete building structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1997, 1 (3): 90-115
- [41] Gilstrap J M, Burke C R, Dowden D M, et al. Development of FRP reinforcement guidelines for prestressed concrete structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1997, 1 (4) :131-139
- [42] Bakht B, Al-Bazi G, Banthia N, et al. Canadian bridge design code provisions for fiber-reinforced structures [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, 4 (1) :3-15
- [43] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋 FRP 在混凝土结构中的应用 [J]. 工业建筑, 1999, 29 (2) :19-21
- [44] Keller T. Fibre Reinforced Polymer Materials in Building Construction [C/CD] // Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002
- [45] 冯鹏, 叶列平. GFRP 空心板静载试验研究及分析 [J]. 工业建筑, 2004, 34 (4): 15-18+27
- [46] 汤国栋, 汤羽, 冯广占. 中国 GRP/COM 桥梁的研究与实践 [J]. 成都科技大学学报, 1995, (6): 69-80
- [47] Sekijima K, Ogisako E, Miyata K, et al. Analytical study on flexural behavior of GFRP-concrete composite beam [C] // Proc. the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong, China: Elsevier Science Ltd, 2001:1363-1370
- [48] Canning L, Hollaway L, Thorne A M. An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam [J]. Construction and Building Materials, 1999, 13: 417-426
- [49] Kavlicoglu B M, Saiidi M, Gordaninejad F. Fatigue response of new graphite/epoxy-concrete girder [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2003, 7 (1): 50-57
- [50] Hall J E, Mottram J T. Combined FRP reinforcement and permanent formwork for concrete members [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 1998, 2 (2): 78-86
- [51] Van Erp G, Heldt T, McCormick L. Development of an innovative fibre composite deck unit bridge [C/CD] // Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002
- [52] Fam A, Rizkalla S. Large scale testing and analysis of hybrid concrete/composite tubes for circular beam-column applications [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17: 507-516
- [53] Mirmiran A, Samaan M, Cabrera S, et al. Design, manufacture and testing of a new hybrid column [J]. Construction and building materials, 1998, 12 (1): 39-49
- [54] 袁华, 薛元德. 纤维增强塑料管混凝土性能的研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2000, (6): 34-36
- [55] Mirmiran A, Shao Y, Shahawy M. Analysis and field tests on the performance of composite tubes under pile driving impact [J]. Composite Structures, 2002, 55: 127-135
- [56] Burgueno R, Davol A, Zhao L, et al. Flexural behavior of hybrid fiber-reinforced polymer/concrete beam/slab bridge component [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101 (2): 228-236
- [57] Yang Q S, Qin Q H, Zheng D H. Analytical and numerical investigation of interfacial stresses of FRP-concrete hybrid structure [J]. Composite Structures, 2002, 57: 221-226

[58] Davol A, Burgueno R, Seible F. Flexural behavior of circular concrete filled FRP shells [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127 (7): 810-817

[59] Teng JG, Yao J. Self-weight buckling of FRP tubes filled with wet concrete [J]. Thin-walled Structures, 2000, 38 (4): 337-353

[60] Hollaway L C. The evolution of the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure [C] // Proc. the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Hong Kong: Elsevier Science Ltd, 2001: 27-40

[61] Feng P, Ye L P, Bao R, et al. Development and analysis of the large-span FRP woven web structure [C] // Proceedings of 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. Adelaide, Australia: 2004, 12: 8-10, 865-871

[62] Meier U. 关于在直布罗陀海峡最窄处建造碳纤维增强复合材料桥的建议 [J]. 李正仁译. 国外桥梁, 1990, (4): 45-50

[63] Keller T. Fibre Reinforced Polymer Materials in Bridge Construction [C/CD] // Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002

[64] Firth I, Cooper D. Glass Fibre Reinforced Plastic Bridges-Three UK Examples [C/CD] // Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002

[65] Sobrino J A, Pulido M D G. A new glass-fibre-reinforced arch bridge in Spain [C/CD] // Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002

[66] The Highways Agency, The Scottish Office Development Department, The Welsh Office Y Swyddfa Gymreig, The Department of the Environment for Northern Ireland. Enclosure of Bridge [S]. BD 67/96. London: HMSO, 1996

[67] Heidengren C R. Regal crossing [J]. Civil Engineering Magazine, ASCE, 2003, 73 (7)

[68] Plunkett J D. Fiber-reinforced polymer honeycomb short span bridge for rapid installation [R]. IDEA Project Final Report. Contract NCHRP- 96-ID030. 1997

[69] 李建保. 碳纤维复合材料在智能建筑结构中的应用 [C] // 第二届纤维增强塑料及工程应用学术交流会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002: 34-40

[70] Bakis C E, Nanni A, Terosky J A, et al. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid reinforcement rods for concrete application [J]. Composite Science & Technology, 2001, 61: 815-823

[71] 王勃. FRP 加筋混凝土梁的力学与自感知性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2004

[72] Bontea D M, Chung D D, Lee G C. Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 651-659

[73] Kalamkarov A L, Georgiades A V, MacDonald D O, et al. Pultruded fiber reinforced polymer reinforcements with embedded fiber optic sensors [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27: 972-984

(上接第 18 页)

凝土压坏同时发生以及混凝土压坏但芳纶纤维筋未拉断等破坏模式的判别式和受弯承载力计算方法, 计算结果与试验结果符合良好; 此外, 还提出按照中和轴高度对梁破坏模式进行判别的方法。

(3) 实测了芳纶纤维筋有黏结部分预应力混凝土梁的荷载- 位移曲线呈三直线形状, 分别以混凝土开裂和非预应力环氧涂层钢筋屈服为弯折点。对非预应力环氧涂层钢筋屈服前的第二直线段的刚度进行分析, 求出刚度折减系数 $\alpha_{0.5}$ 随换算配筋率 ρ_E 和预应力度 l 变化的拟合计算公式, 应用双直线原理推导出短期刚度计算公式, 计算结果与试验结果符合良好。

(4) 实测了芳纶纤维筋有黏结部分预应力混凝土梁的开裂荷载、裂缝分布及开展情况, 芳纶纤维筋作为有黏结预应力筋能够与环氧涂层钢筋共同改善裂缝

的分布, 控制裂缝的开展。通过线性回归得到裂缝间距的计算公式, 在计算梁受拉区纵向钢筋的等效应力 σ_{sk} 时, 引入芳纶纤维筋等效应力系数 l_{fe} , 并计及环氧涂层钢筋对裂缝间应变不均匀系数的增大影响等, 得出了芳纶纤维筋有黏结部分预应力混凝土梁的平均裂缝宽度计算方法, 其计算结果与试验结果符合良好。

参 考 文 献

[1] CEB 欧洲国际混凝土委员会. 1990CEB-FIP 模式规范 (混凝土结构) [S]. 中国建筑科学研究院结构所规范室, 译, 1991

[2] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003

[3] 聂永明, 陶学康. 环氧涂层钢筋搭接长度及梁受弯性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2000, (1): 24