

FRP 结构和 FRP 组合结构在结构工程中的应用与发展

冯 鹏 叶列平

清华大学土木工程系 北京 100084

提要：纤维增强复合材料（FRP）是近年来在结构工程中开始应用的新型材料，除了已在结构加固中得到广泛应用外，FRP 结构和 FRP 组合结构等新型结构形式也越来越受到工程界的重视。本文详细介绍了结构工程中常用的 FRP 材料的类型，深入分析了其优点与不足，并介绍了全 FRP 人行桥、FRP 桥面体系、FRP 大跨结构体系、FRP 管混凝土、FRP 组合梁板等形式的 FRP 结构和 FRP 组合结构在国内外的应用和发展概况。

关键词：FRP 结构，FRP 组合结构，桥梁，网架

1. 前言

纤维增强复合材料（FRP）从上世纪 40 年代问世以来，在航空、航天、船舶、汽车、化工、医学和机械等工业领域得到了广泛的应用。近年来，FRP 又以其高强、轻质、耐腐蚀等优点，成为土木工程的一种新型结构材料。除了应用 FRP 片材加固修补结构工程外，FRP 结构和 FRP 组合结构的应用也日益受到工程界的重视。

FRP 结构是主要结构构件完全采用 FRP 材料组成的结构，如由 FRP 管组成空间网架结构等。FRP 组合结构则是指 FRP 材料与传统的结构材料，主要是混凝土和钢材，通过合理的组合，共同工作，来承受荷载的结构形式，如：FRP 管混凝土、FRP 型材—混凝土叠合梁、FRP—混凝土叠合板等。FRP 作为结构材料，具有比强度高、比模量高，耐腐蚀、构件可设计、易成型等优点，通过与传统材料进行合理地组合，更能发挥它的优势。

从上世纪 70 年代开始，FRP 材料开始在结构工程中得到应用。英国、美国和以色列最先应用这种新型材料作为建筑结构和桥梁结构中的主要构件^[1]，当时大多采用 GFRP（即玻璃钢）。70 年代后期，我国也开始对 GFRP 进行研究。1982 年，北京密云建成了跨径 20.7 米、宽 9.2 米的 GFRP 简支蜂窝箱梁公路桥，设计荷载等级汽—15、挂—80，并进行了现场的荷载试验，证明了 FRP 作为承重构件的可行性。通车后出现蜂窝失稳导致桥面下陷和箱梁腹板上方局部压屈的问题。1987 年进行了检修，将承重体系改造成 GFRP—混凝土组合结构，使用至今，运行状况良好^[1]。早期的 FRP 结构大多是尝试性质的，如表 1 所示，还不能在土木工程中形成规模。

近年来，FRP 材料的种类和生产手段迅速发展，产品形式不断更新，使得 FRP 结构和 FRP 组合结构在土木工程中应用的形式也更加多样，如 FRP 斜拉桥和悬索桥中的索、FRP 桥面板、FRP 网架、FRP 组合梁板、FRP 管混凝土柱、FRP 渡槽和输水管、FRP 夹心板屋盖、FRP 永久模板以及挡土墙、水坝等，体现出 FRP 结构和 FRP 组合结构在土木工程中应用的广阔前景。

表1 结构工程中早期的FRP结构^{[1][2][3]}

年代	地点	简介
1968	利比亚, 班加西	英国制造安装, 试验性结构, 港口货仓, 采用 GFRP 夹心板+铝质骨架
1970	英国, 利物浦	连续梁人行桥, 跨径 10 米、宽 1.5 米, GFRP
1972	以色列, 特拉维夫	简支梁人行桥, 跨径 24 米、宽 1.8 米, GFRP
1972	阿联酋, 迪拜	英国制造安装, 机场, 伞状屋顶, GFRP, 手糊工艺
1974	英国, 伦敦	鲜花交易市场, 钢网架屋盖板, GFRP
1974	英国, 兰开夏	试验性结构, 教室, 三棱锥组成空间结构, 骨架和围护全部采用 GFRP
1976	美国, 弗吉尼亚	简支桁架人行桥, 跨径 4.9 米、宽 2.1 米、高 0.46 米, GFRP
1982	中国, 北京密云	简支梁公路桥, 跨径 20.7 米、宽 9.2 米, GFRP 蜂窝箱梁
1982	保加利亚, 索菲亚	简支梁公路桥, 跨径 12 米、宽 8 米, GFRP
1982	美国	简支桁架公路桥, 跨径 32.3 米, CFRP+GFRP
1986	中国, 重庆	单塔斜拉人行桥, 跨径 27.4 米、宽 4.4 米, GFRP 梁

表2 结构工程中常用纤维的主要力学性能与钢材对比

纤维种类		相对密度 γ	拉伸强度 σ_b (GPa)	模量 E (GPa)	热胀系数 α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	延伸率 δ (%)	比强度 σ_b/γ (GPa)	比模量 E/γ (GPa)
玻璃纤维 GFRP	S(高强)	2.49	4.6	84	2.9	5.7	1.97	34
	E(低导)	2.55	3.5	74	5	4.8	1.37	29
	M(高模)	2.89	3.5	110	5.7	3.2	1.21	38
	AR(抗碱)	2.68	3.5	75	7.5	4.8	1.31	28
碳纤维 CFRP	普通	1.75	3.0	230	0.8	1.3	1.71	131
	高强	1.75	4.5	240	0.8	1.9	2.57	137
	高模	1.75	2.4	350	0.6	1.0	1.37	200
	极高模	2.15	2.2	690	1.4	0.5	1.02	321
芳纶纤维 AFRP	Kelvar 49	1.45	3.6	125	2.5-4.0	2.8	2.48	86
	Kelvar 29	1.44	2.9	69		4.4	2.01	48
	HM-50	1.39	3.1	77		4.2	2.23	55
钢材	HRB400	7.8	0.42	200	12	18	0.05	26
	钢绞线	7.8	1.86	200	12	3.5	0.24	26

表3 结构工程中常用树脂基体的性能

名称	相对密度 γ	拉伸强度 σ_b (MPa)	模量 E (GPa)	延伸率 δ (%)	抗压强度 σ_c (MPa)	抗弯强度 σ_f (MPa)	特性
环氧	<1.15	<85	3.2	5	<110	<130	粘结力强、浸润性好
酚醛	1.3	42-64	3.2	2.0	<110	<120	耐高温、绝缘、价廉
聚酯	<1.4	<71	2.1-4.5	5	<190	<120	工艺性好、价廉
聚酰胺	1.1	70	2.8	60	90	100	热塑性树脂
聚丙烯	0.9	35-40	1.4	200	56	<56	热塑性树脂

2. 结构工程中的FRP材料

FRP材料与混凝土、钢材等传统的结构材料相比较,是非常年轻的结构材料,设计方法也不成熟,因此深入地了解这种材料的性能是其在工程结构应用的前提。

2.1 分类

FRP 是纤维增强复合材料的统称。所谓复合材料是由增强材料和基体构成，根据复合材料中增强材料的形状，可以分为颗粒增强复合材料、层合复合材料和纤维增强复合材料三种，FRP 只是其中的一种。而 FRP 中的基体种类有：树脂基体、金属基体、陶瓷基体和碳素基体；而纤维种类有：玻璃纤维、硼纤维、碳纤维、芳纶纤维、陶瓷纤维（包括碳化硅纤维和氧化铝纤维）、聚烯烃纤维以及金属纤维。组分不同，FRP 的性能会有很大的差别。目前结构工程中常用的 FRP 材料主要是树脂基体的玻璃纤维（GFRP）、碳纤维（CFRP）和芳纶纤维（AFRP），它们的主要性能见表 2 和表 3^{[4][5]}。可以看出，各种 FRP 材料的力学性能参数变化范围很大，因此在工程中有很大的灵活性，具有可设计性。

2.2 FRP 产品形式与生产工艺

2.2.1 FRP 片材：FRP 布和 FRP 板

FRP 布是目前结构工程中应用最广泛的 FRP 制品，见图 1。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，主要应用于结构的加固，也



图 1 CFRP 布

可以作为生产其它的 FRP 制品的原料。FRP 板是将纤维在工厂中经过平铺、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，FRP 板可以承受纤维方向上的拉压，但在垂直纤维方向上强度和弹性模量很低。

2.2.2 FRP 棒材：FRP 索和 FRP 筋

FRP 索是将连续的长纤维单向编织，形成绳索状的 FRP 制品，再用树脂浸润固化而制成，见图 2。FRP 筋是采用拉挤工艺生产，在表面进行处理可以带肋，见图 3。



图 2 CFRP 索

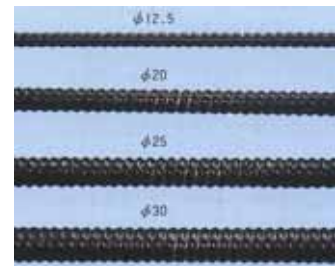


图 3 CFRP 筋

FRP 棒材可以在混凝土中代替钢筋，也可以作为预应力筋。

2.2.3 FRP 网格材、FRP 格栅

将长纤维束按照一定的间距相互垂直交叉编织，再用树脂浸润固化形成 FRP 网格或 FRP 格栅，见图 4 和图 5。

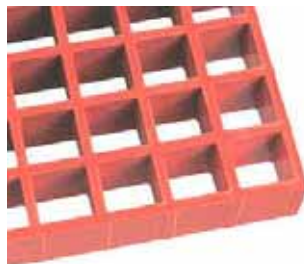


图 4 GFRP 格栅



图 5 CFRP 网格

FRP 网格可以直接代替钢筋网片，也可以使用

3 维的 FRP 网笼直接代替钢筋笼。

2.2.4 FRP 拉挤型材

FRP 型材的拉挤生产工艺，是将纤维束或纤维织物通过纱架连续喂入，经过一个树脂槽将纤维浸渍，再穿过热成型模具后进入拉引机构，形成连续的 FRP 制品，见图 6 和图 7。拉挤工艺可以生产出截面形状复杂的连续型材，纤维主要沿轴向，而且纤维含量可以达到 60~70%，有很好的受力性能。FRP 拉挤型材可以直接作为结构构件，也可以与其它材料组合。图 8 为 FRP 拉挤型材组合的格栅。



图 6 GFRP 拉挤生产：喂料、浸胶



图 7 GFRP 拉挤生产：成型



图 8 GFRP 拉挤型材组合格栅



图 9 FRP 缠绕生产

2.2.5 FRP 缠绕型材

缠绕工艺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，常见的有管、罐、球等，见图 9。FRP 缠绕型材可以承受很大的内压，已广泛用于压力容器、管道等。在工程结构中，FRP 缠绕管内充填混凝土可以作为柱、桩，甚至梁，构件性能大大优于普通钢筋混凝土。

2.2.6 FRP 模压型材

模压工艺是将预浸树脂的纤维或织物，干燥后放入金属模具中进行加温加压固化而成型。可以采用长纤维，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，通常在平面内呈现为各向同性。

2.2.7 手糊 FRP 产品

手糊成型是指在室温低压或无压下用树脂将纤维或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。这种方法可以生产出形状复杂、纤维铺陈方向任意、大尺寸的 FRP 产品，但是产品质量不易稳定。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。手

糊 FRP 产品的灵活性和可设计性很强，非常适合在结构中应用。

2.2.8 FRP 夹层板、蜂窝板

FRP 夹层板、蜂窝板由上下面的 FRP 板和夹心材料组成，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，是非常合理的构件形式。FRP 夹层板、蜂窝板的生产成型方法主要有两种：一次成型和二次成型，一次成型方法有手糊和真空树脂传递模塑法；二次成型方法主要是型材粘接。FRP 夹层板、蜂窝板在飞机结构、船舶结构中的应用获得了很大的成功，在土木工程结构中也将大有用武之地。

2.2.9 其它生产工艺和再加工的产品

还有一些其它的 FRP 生产工艺，例如：喷射成型法、离心成型法等等，可以生产出性能形状各异的 FRP 产品。而且还可以对 FRP 产品进行二次加工，应用不同的 FRP 产品进行合理组合，来满足工程要求。

上面这些 FRP 产品，可以直接和经过加工后在 FRP 结构和 FRP 组合结构中应用。

2.3 FRP 材料的特点

FRP 材料具有许多与传统结构材料所不同的特点，了解和掌握 FRP 材料的优缺点，才能在设计中充分发挥它的优势，克服劣势。

2.3.1 优点

FRP 材料最突出的优点在于它有的很高比强度，即通常所说的轻质高强。由表 2 可见，FRP 的比强度是钢材的 20~50 倍，因此采用 FRP 材料将会大大减轻结构自重。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][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。FRP 结构和 FRP 组合结构是获得超大跨度的重要途径。在抗震结构中，FRP 结构和 FRP 组合结构的应用可以减小地震作用。

FRP 材料具有良好耐腐蚀性，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比拟的。目前在化工建筑、地下工程和水下特殊工程中，FRP 材料耐腐蚀的优点已经得到实际工程的证明。在瑞士、英国、加拿大等国家的寒冷地区以及一些国家的近海地区已经开始在桥梁、建筑中采用 FRP 结构代替传统结构以抵抗除冰盐和空气中盐分的腐蚀，使得结构的维护费用和周期都将大大降低。

FRP 材料具有很好的可设计性，可以通过使用不同纤维种类、控制纤维的含量和铺陈不同方向的纤维设计出各种强度和弹性模量的 FRP 产品。而且 FRP 产品成型方便，形状可灵活设计。

FRP 材料的弹性性能好，应力应变曲线接近线性，在发生较大变形后还能恢复原状，塑性变形很小，这对于承受较大动载和冲击荷载的结构比较有利。

FRP 产品非常适合于在工厂生产、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，有利于提高劳动效率，有利于建筑工业化。

FRP 产品还有一些其它优势,如透电磁波、绝缘、隔热、热胀系数小等等,这使得 FRP 结构和 FRP 组合结构在一些特殊场合能够发挥难以取代的作用。

2.3.2 缺点

与传统结构材料不同,FRP 材料通常表现为各向异性,纤维方向的强度和弹模较高,而垂直纤维方向的强度和弹模很低。有关资料表明,两个方向的抗拉强度相差可达 25 倍,抗压强度相差可达 5 倍,模量相差可达 13 倍。此外,纤维方向的抗拉强度比抗压强度高 30%。因此在设计 FRP 结构和 FRP 组合结构时,需要对两个方向分别进行设计。由于 FRP 材料各向异性,在受力上有许多不同于传统结构材料的现象,例如拉伸翘曲现象,这在各向同性材料中是没有的,这就加大了 FRP 结构和 FRP 组合结构的设计难度。

与钢材相比较,大部分的 FRP 产品的弹性模量较低:大约为钢材的 $1/20\sim 1/2$,大致与混凝土和木材在同一数量级。弹模低是 FRP 作为结构材料最大的劣势,在 FRP 结构设计中要充分考虑这个特点,应尽量使用几何刚度来弥补材料刚度的不足,也可以采用 FRP 组合结构达到刚度要求。

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 结构可以采用铆接、栓接和粘接,但不管那种连接方式,连接部位都是整个构件的薄弱环节。这就要求 FRP 结构和 FRP 组合结构设计中应尽量将 FRP 设计为一个整体,减少连接。此外设计合理的榫接和销接是适合 FRP 结构和 FRP 组合结构的连接方式。

与钢材相比,FRP 材料强度有较大的离散性。钢材屈服强度的离散系数约为 0.1,而 FRP 产品拉伸强度的离散系数约为 0.15。

与混凝土相比,一般 FRP 材料的防火性能较差。临界温度为 300℃左右,而且部分树脂材料有可燃性。通过改变树脂的组分,可以改善 FRP 的防火性能。目前采用环氧树脂的 FRP 材料,可在树脂中掺入阻燃剂,表面进行防火处理,其效果已经可以与混凝土结构相当。

2.3.3 值得讨论的特点

大量的研究表明,FRP 材料本身的抗疲劳性能优于传统结构材料^{[5][9][10][11]},但是值得重视的是,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。因此需要对实际工程中的 FRP 结构和 FRP 组合结构整体的抗疲劳性能应进行深入研究。

FRP 材料的耐久性是很多学者关心的问题^{[12][13][14][15][16]}。目前许多 FRP 产品供应商都通过加速试验来证明自己的产品寿命在 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最多 30 年。应该注意的是,耐久性不仅仅是材料老化,还包括温度变化影响、湿度变化影响、FRP 的蠕变和应力松弛以及 GFRP 与混凝土碱性反应等等问题,而且在实际环境下这些因素是共同作用,相互影响的。在我国,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。

经济性是所有工程师都很关心的问题。从材料价格上来看,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,带来的综合效果是值得工程师重

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%^[8]。从结构整个生命周期的费用来看，FRP 结构和 FRP 组合结构有明显的优势，尤其在一些工作环境恶劣的地方，FRP 结构和 FRP 组合结构的经济性相当明显。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^[17]。另外，由于 FRP 结构和 FRP 组合结构的应用目前还处在验证阶段，初期费用是偏高的，当应用量增大，FRP 产品生产规模扩大，势必使其成本大大降低。

3. FRP 结构和 FRP 组合结构

3.1 全 FRP 结构人行桥

FRP 结构自重轻、耐久性好、施工安装方便等优点首先为桥梁工程师所认识，研究人员首先在人行天桥结构上进行尝试^[18]。1986年在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，设计荷载 3.5kN/m²，自重 8.9t（为钢桥的 30%，混凝土桥的 13%），GFRP 蜂窝夹心板组合箱梁，斜缆为高强钢丝束，其它为混凝土结构。总造价 25 万，平均每平米 0.1 万（当时钢桥为 0.28 万）。



图 10 重庆陈家湾桥



图 11 重庆观音桥

此后四川省内又建成多座 FRP 人行桥：（1）1988 年建成的重庆陈家湾桥，中承式空间刚构人行桥，3 跨 GFRP 连续梁，跨长 11.2m，桥宽 4.0m，设计荷载 4.0kN/m²，见图 10；（2）1988 年建成的重庆观音桥，中承式空间刚构人行天桥，4 跨 GFRP 连续梁，跨长 9.8m 和 19.2m，桥宽 4.2m，设计荷载 4.0kN/m²，见图 11；（3）1988 年建成的泸州人行桥，单跨 GFRP 简支梁桥，跨长 13m，桥宽 4.0m，设计荷载 3.5kN/m²；（4）1992 年建成的攀枝花华山桥，中承式交叉拱人行桥，4 跨 GFRP 连续梁，跨长 6.0m，桥宽 3.0m，设计荷载 3.5kN/m²；（5）1993 年建成的成都川棉桥，非对称提篮拱人行桥，GFRP 梁长 10.06m，桥宽 5.0m，设计荷载 4.0kN/m²；（6）1993 年建成的成都向阳桥，非对称提篮拱，GFRP 梁长 50m，跨江，桥宽 4.0m，设计荷载 4.0kN/m²。此外，在香港、深圳、新疆等地都有应用 FRP 结构的人行天桥相继建成使用。FRP 结构在我国的人行天桥中得到了大量的应用。

这些 FRP 人行桥大多采用手糊 GFRP 产品，成型容易，可以生产出形式多样的结构，都以其新颖的形状而成为城市景观。但手糊制品质量的离散性大，加上用传统玻璃钢制品的设计生产经验来制作结构构件，产品质量和设计方法都难以适合结构工程应用的需要，出现过一些质量问题，如交院桥使用不到 10 年，桥面下陷，变形逐渐增大，最终不

得不采用钢梁加固；2001年，观音桥也因为桥面下陷严重，跨中挠度达到147mm，变形过大而拆除。但是大部分FRP人行天桥还在正常使用中。

1990年日本在PWRI（Public Works Research Institute）的支持下建成了一座全FRP结构的试验桥，见图12，用来验证全FRP结构的可行性和耐久性。此桥为双塔双索面斜拉体系，边跨4.5m，主跨11.0m，宽2.0m，设计活荷载 3.5kN/m^2 。设计中，使各个构件自重都小于150kg，避免使用起重设备，采用16mm直径的FRP螺栓连接。桥柱、梁、桥板和扶手都是GFRP拉挤型材，局部用CFRP布加强，CFRP斜拉索，混凝土基础。结构总重4.4t，恒载/活载为0.3。荷载试验和长期变形观测表明了全FRP结构桥梁的可行性。



图12 日本全FRP试验桥

1992年，英国苏格兰的Aberfeldy高尔夫俱乐部的球场中，建成了一座全FRP结构的斜拉人行天桥，见图13。全长113m，主跨为63m，宽2.2m，双塔双索面斜拉体系。A型桥塔，17.2m高，拉索最大倾角 30° 。桥塔、梁、桥面板和扶手都采用了箱形截面的GFRP拉挤型材（弹模22GPa，强度300MPa），斜拉索为AFRP



图13 全FRP人行桥（英国，Aberfeldy）

索（弹模127GPa，强度1900MPa）外裹聚乙烯保护，部分连接为金属连接。这座桥是世界上第一座全FRP结构桥梁，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。在潮湿环境下使用4年后，有少许的下坠，主要是拉索的应力松弛造成的，但不影响正常使用。这座桥获得了很好的经济效益和社会效益，此后在欧洲各国，都开始修建全FRP结构的人行天桥，并开始深入研究FRP结构^{[19][20][21]}。

1997年，瑞士Pontresina的风景区内建成了一座跨河全GFRP的人行桥。双跨连续桁架，跨度12.5m，宽1.50m，设计活荷载 5kN/m^2 ，采用GFRP拉挤型材粘接而成。因为它非常轻，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。

1997年，丹麦建成一座独塔双索面斜拉人行桥，它全长40m（27m+13m），宽3.2m，设计活荷载为 5kN/m^2 的均布荷载+50kN的移动点荷载，全部采用GFRP，总造价比混凝土和钢桥高5~10%，设计寿命50年。拉索采用 $100\times 100\text{mm}^2$ 的GFRP筋，桥塔和梁为GFRP拉挤型材组成，塔高18.5m，总重12.5t。该桥跨越了一条非常繁忙的铁路，为防止意外发生，设计留有很大的安全储备。整座桥梁在工厂生产，现场安装只用了18个小时，充分显示出FRP结构轻质高强便于施工的优势。

随着FRP结构在日本、欧洲等地研究应用的深入，美国也开始对FRP结构逐渐重视。1992年，Nebraska大学设计了一座300m长的全FRP双塔斜拉人行天桥，对该桥进行了三维动力分析和风洞试验，并研究阻尼系统对桥的振动控制。1996年FHWA(Federal

Highway Administration)派出考察团访问欧洲和日本,考察了 23 个应用 FRP 的项目^[21]。此后,美国在 Chicago、Hawaii、Daniel Boone 国家公园等地相继建成了许多全 FRP 结构的人行天桥^[22]。

3.2 公路桥梁中的 FRP 结构和 FRP 组合结构体系

在全 FRP 结构人行桥出现的同时,FRP 结构以及 FRP 与传统材料相结合的组合结构开始应用在承受较大反复动载的公路桥梁中。

FRP 夹层板桥面体系是近几年里倍受关注的一种新型桥面结构体系,它全部由 FRP 材料制成,由上下面板中夹肋板构成,断面型式多样。重量很轻,便于安装,而且能够抵抗除冰盐、海水的侵蚀,维护费用低。它在工厂中加工成型,根据生产工艺的不同可以分为一次成型夹心板(通常是真空树脂传递模塑法工艺或手糊工艺)和拉挤型材粘结板,部分产品如图 14 所示,连接固定的方式主要通过金属螺栓连接和粘接。。FRP 桥面板的自重为 $0.75\sim 1.1\text{kN/m}^2$,是传统桥面板的 $1/3\sim 1/4$;单位价格为混凝土桥板的 3~4 倍,为钢桥板的 2 倍。在 HS20 级荷载的作用下,桥板最大变形为 $L/450\sim L/1300$,一次成型的夹心板的变形比粘贴成型的变形要小。

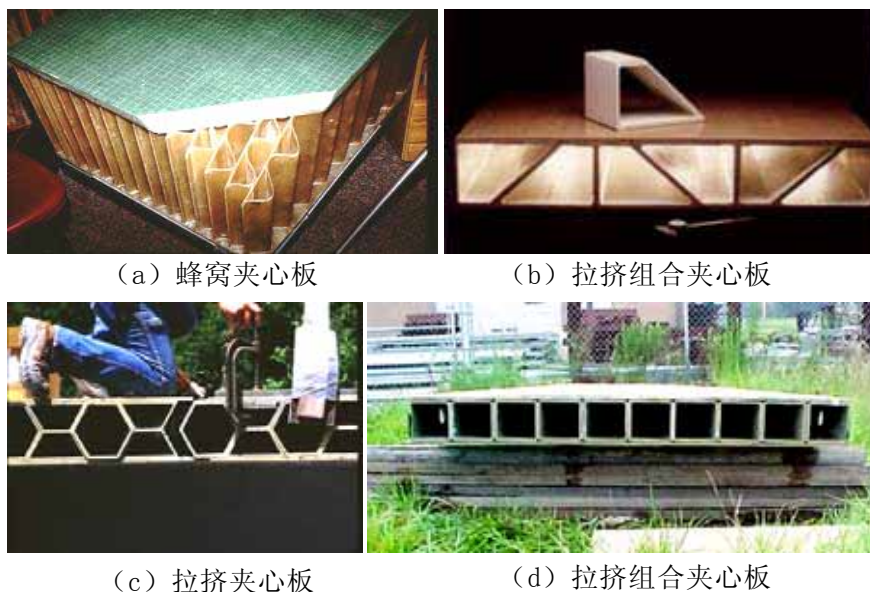


图 14 FRP 桥面板产品

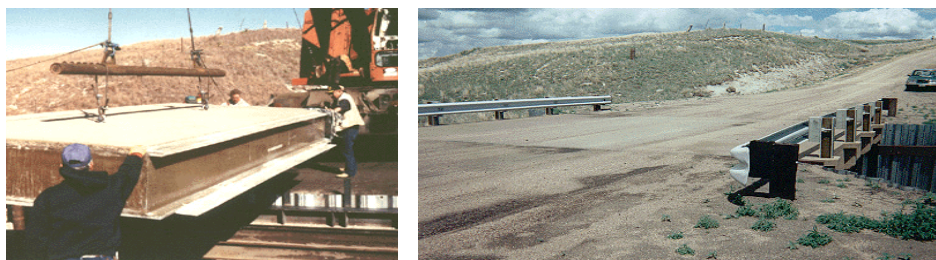


图 15 最早的 FRP 桥面公路桥(美国, Kansas)

1996 年,美国 Kansas 州 Russell 附近的无名沟壑上架起了第一座采用 FRP 桥面板公路桥,见图 15。桥净跨 6.48m,宽 8.46m,设计荷载 HS-20,现场施工安装只用了 8

小时。同年，在加州大学 San Diego 校区内也建成一座试验性质的小桥，设计荷载 HS-20。此后不到十年的时间里，FRP 桥板在美国发展迅速，现在已经有几十座中小型桥梁。

除了采用 FRP 桥板结构作为新建桥梁的桥面板以外，它还被应用在老化桥梁的修理，即使用 FRP 桥板替换原有的混凝土桥板，使桥面结构自重减轻，动载等级提高，使用寿命延长。在 New York、Maryland、Oregon 等地，有十几座老桥，主要是钢结构桥，重新采用了这种 FRP 桥板，从而使老桥重新焕发青春。

在 FRP 桥面板的基础上，出现了一些全部为 FRP 结构或 FRP 组合结构的桥梁。其中一种形式是采用 FRP 结构和 FRP 组合结构作为 FRP 桥面板的支撑梁，形成完整的 FRP 结构或 FRP 组合结构桥面体系。梁的形式有：全 CFRP 型材（见图 16）、GFRP 夹层箱形梁、CFRP 管内填充混凝土^[25]。



图 16 CFRP 型材梁

Missouri 大学的 Nanni 教授的研究组还开发出了一种采用 GFRP 和 CFRP 混合纤维的拉挤方形管的桥梁体系^[26]，见图 17。所有的方管都是 3×3 英寸（76.2×76.2mm），方管纵横交错的层铺粘接组成梁和桥面板。这种桥面体系中所有构件都是粘接组合方管制成，非常适合工厂生产。在 Missouri 大学校园内里已经建成立一座试验性的桥，跨度为 9.14m，设计车载 HS-20。



图 17 用统一拉挤型材制成的全 FRP 桥



图 18 Bond Mill 桥：开合式 FRP 桥

在欧洲，FRP 结构的公路桥也得到发展。1994 年，英国就用 GFRP 拉挤型材组合成了一座可以通过 40t 卡车的活动桥——Bond Mill 桥，见图 18。桥长 8.22m，4.27m 宽，由 6 根 FRP 箱形梁组成，梁高 0.85m。当通过船时，以一岸为轴，另一边翘起。还有一种 FRP 桥面板在欧洲得到了发展：宽 0.45m，高 0.2m 的 GFRP 拉挤夹心板条，通过现场的粘接和栓接，形成桥面板，并且还在建筑中作为楼面板使用^[27]。

在公路桥梁中，FRP 材料还有一些其它的应用形式，例如利用 FRP 索替代钢索作为斜拉索或悬索，FRP 预应力钢筋混凝土结构等等。

3.3 大跨建筑中 FRP 结构体系

早在上个世纪 70 年代，GFRP 材料就开始在建筑中应用，主要是在墙体、地面、门窗、临时建筑的屋顶等等非结构构件或承受很小荷载的构件中^[28]。近年来，FRP 产品的种类更加丰富，性能和生产工艺也有了很大的改进。FRP 材料开始以轻质高强的特点在

大跨结构中崭露头角。



图 19 CFRP 网架杆件

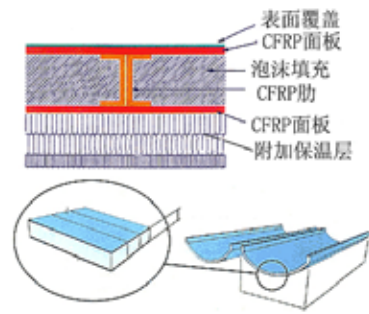


图 20 FRP 轻质屋盖

日本首先将 FRP 用在空间结构体系中, 出现了 CFRP 网架结构。图 19 为我国台湾生产的 CFRP 网架杆件。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 $1/5 \sim 1/4$, 施工强度高, 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 $1/5$ 。根据有关经济分析, 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。

用 FRP 制成的轻质屋盖也是一种大跨度 FRP 结构。它类似于 FRP 夹心板, 在上下的 FRP 面板中夹有拉挤型材的 FRP 加劲肋, 空洞内填充泡沫塑料, 见图 20。这种 FRP 屋面板可以做成弧形、拱形、壳形甚至更加复杂的形状, 也可以通过树脂填料制成各种鲜艳而且不会褪去的颜色, 且本身能够隔热保温。日本 Toray 公司生产这种屋面体系时, 在 GFRP 面板表面覆盖了 CFRP, 使耐久性和力学性能得到了极大的改善。

3.4 FRP 管混凝土结构

缠绕成型的 FRP 管中填充混凝土, 形成 FRP 管混凝土组合构件是最为合理的一种 FRP-混凝土组合结构构件, 且 FRP 管可以充当模板, 节省模板消耗, 提高施工速度, 并具有很好的耐久性。由于它的优势非常明显, 在结构工程中里得相当广泛的应用: 如桩、柱甚至作为梁。

世界各国学者对于 FRP 管混凝土的研究进行的比较深入, 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、长期工作状态下的 FRP 管混凝土的受力性能及其 FRP 管中纤维种类和缠绕角度都有深入地研究^{[16][29][30][31][32][33]}。

还有一些学者对 FRP 管混凝土构件进行了改进。在 FRP 管内设置 FRP 肋 (包括横肋、纵梁和斜肋), 从而在加强 FRP 管局部稳定性的同时起到钢筋的作用, 增强 FRP 管混凝土的受力性能。还有在 FRP 管中心放置泡沫塑料圆柱, 浇注混凝土后形成环形截面, 减小自重, 提高构件抗弯性能^[33]。

3.5 FRP 组合梁、板

FRP 组合梁和 FRP 组合板是受弯的 FRP 组合结构，通过组合作用使上部的混凝土受压，下部 FRP 受拉，其中最关键的部分是保证 FRP 和混凝土协同工作的剪力连接件。经过组合 FRP 材料利用的更加充分，而且可以将轻质的 FRP 构件作为永久性模板，方便施工。

关于 FRP 组合梁和 FRP 组合板的研究在各国都有开展。美国 Saiidi 等人采用树脂粘贴的方法将混凝土板与 CFRP 构件组合在一起，并且研究了它们的受力^[34]。Hall 等人采用 FRP 拉挤型材为混凝土模板，通过拉挤型材的 T 形肋做 FRP 和混凝土之间的剪力连接件^[35]。日本的 Kenzo Sekijima 则采用 FRP 工形截面型材与混凝土面层组合，传统的销钉为剪力连接件，有限元计算和试验结果都表明，构件刚度折减约为 20%（钢-混凝土组合结构约为 15%）^[36]。我国的张巨松等人采用 3mm 厚的 GFRP 方形空心管为混凝土梁外模，上部开洞浇筑振捣，使得混凝土梁的承载能力和变形能力大大提高^[37]。FRP 组合梁板体系现在还处在试验研究阶段，在实际工程中的应用还比较少。

4. 结语

FRP 材料在结构工程中有着非常广阔的应用前景，但仍有大量关于 FRP 结构和 FRP 组合结构基本理论和设计方法的科研工作亟待进行，培养既了解复合材料设计又熟悉结构设计的复合型工程师也是非常急需的。

FRP 材料是新兴的材料，FRP 结构和 FRP 组合结构在结构工程中必然在新世纪中得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1] 蔡国宏. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景. 中国交通, 交通部科学研究院. <http://www.iicc.ac.cn/tech/gxjs/gxjs1201.htm>
- [2] 薛元德, 胡培. 纤维复合材料应用于基础设施工程——面向 21 世纪的机遇和挑战. 高科技纤维与应用. 2000. Vol. 25 (2): 9-13
- [3] L. C. Hollaway. The Evolution of and the Way Forward for Advanced Polymer Composites in the Civil Infrastructure. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:27-40
- [4] 沈观林. 复合材料力学. 清华大学出版社. 1996
- [5] 邹祖诤 主编. 复合材料的结构与性能, 材料科学与技术丛书 (第 13 卷), 吴人洁等译. 科学出版社. 1999
- [6] 上海玻璃钢结构研究所. 玻璃钢结构设计. 中国建筑工业出版社. 1980
- [7] 张锡祥, 顾安邦. 复合材料用于大跨斜拉桥发展展望. 重庆交通学院学报. 1995.

Vol.14 (1): 14-19

- [8] 杨允表, 石洞. 复合材料在桥梁工程中的应用. 桥梁建筑. 1997 (4): 1-4
- [9] C. E. Demers. Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites. Construction and Building Materials. 1998. Vol.12 (5): 311-318
- [10] A. B. Temeles. Field and Laboratory Tests of a Proposed Bridge Deck Panel Fabricated from Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Component. Thesis for Master of Science in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. May 14, 2001
- [11] N. G. McCrum. 纤维增强塑料科学评述. 张碧栋等译. 中国建筑工业出版社. 1980
- [12] CERF report. Gap analysis for durability of fiber reinforced polymer composites in civil infrastructure. ASCE. 2001
- [13] V. M. Karbhari. Durability of FRP composites in Civil Infrastructure - Myth or Reality. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1489-1496
- [14] R. Sen. Durability of advanced composites in a marine environment. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1509-1516
- [15] E. David & J. D. Neuner. Environmental durability studies for FRP systems: definition of normal conditions of use of FRP for structural strengthening applications. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1551-1558
- [16] H. A. Toutanji. Durability characteristics of concrete columns confined with advanced composite material. Composite Structure. 1999. Vol.44 (2-3): 155-161
- [17] H. E. Nystrom, S. E. Watkins, A. Nanni & S. Murray. Financial viability of fiber-reinforced polymer (FRP) bridges. Accepted pending modifications by the Journal of Management in Engineering, ASCE. 2002
- [18] 汤国栋, 汤羽, 冯广占. 中国 GRP/COM 桥梁的研究与实践. 成都科技大学学报. 1995 (6): 69-80
- [19] Th. Keller. All-composite bridges and a hybrid composite building in Switzerland. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1405-1412
- [20] M. W. Brastrup. Cable-Stayed GFRP Footbridge across Railway Line, Cable-Stayed Bridges-Past, Present and Future. Proceedings IABSE Conference, Malmö. 1999: 62-64

- [21]FHWA report. FHWA Study Tour for Advanced Composites in Bridges in Europe and Japan. Federal Highway Administration U. S. Department of Transportation. Oct. 1997
- [22]Strongwell Corp. Bridge superstructure and deck system components and applications. <http://www.strongwell.com/Special/bridges.htm>
- [23]A. Zhou, J. T. Coleman, J. J. Lesko & T. E. Cousins. Structural analysis of FRP bridge deck system from adhesively bonded pultrusion. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd.2001:1413-1420
- [24]B. J. Brown. Design Analysis of Single-Span Advanced Composite Material (ACM) Deck-and-Stringer Bridge Systems. Thesis for Master of Science in Civil Engineering, College of Engineering and Mineral Resources of West Virginia University. December 1998
- [25]L. Zhao, V. M. Karbhari & F. Seible. Development and implementation of the carbon shell system for the Kings Stormwater channel bridge. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd.2001:1299-1306
- [26]J. Unser, P. Kumar, K. Chandrashekhara, A. Nanni & S. Watkins. Adaptable All-Composite Bridge Concept. Proceedings of the CFA Composites Conference, Las Vegas, NV, Sept.26-30.2000: 1-15
- [27]T. Zetterberg, B. T. Astrom, J. Backlund & M. Burman. On design of joint between composite profiles for bridge deck applications. Composite Structure. 2001. Vol.51:83-91
- [28]武汉建筑材料工业学院玻璃钢教研室编. 玻璃钢在建筑中的应用. 中国建筑工业出版社. 1980
- [29]A. Mirmiran. Concrete Composite Construction for Durability and Strength. IABSE Symposium Report, Switzerland. 1995: 1155-1160
- [30]Y. Xiao & H. Wu. Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets. Journal of Materials in Civil Engineering. 2000. Vol.12(2):139-146
- [31]A. Davol, R. Burgueno & F. Seible. Flexural Behavior of Circular Concrete Filled FRP Shells. Journal of Structural Engineering. 2001. Vol.127(7):810-817
- [32]J. G. Teng & J. Yao. Self-weight Bulking of FRP tubes filled with wet concrete. Thin-Walled Structures. 2000. Vol.38 (4): 337-353
- [33]A. Fam, B. Flisak & S. Rizkalla. FRP Tubes Filled with Concrete and Subjected

to Axial Loads, Bending and Combined Loads. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1307-1317

- [34] M. Saiidi, F. Gordaninejad & N. Wehbe. Behavior of Graphite/Epoxy Concrete Composite Beams. Journal of Structural Engineering. 1994. Vol. 120(10):2958-2976
- [35] J. E. Hall & J. T. Mottram. Combined FRP Reinforcement and Permanent Formwork for Concrete Members. Journal of Composite for Construction. 1998. Vol. 2(2):78-86
- [36] K. Sekijima, E. Ogisako, K. Miyata & K. Hayashi. Analytical Study on Flexural Behavior of GFRP-Concrete Composite Beam. Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong. Elsevier Science Ltd. 2001:1363-1370
- [37] 张巨松, 曾龙, 王振兴. FRP 作为混凝土工程永久性模板的试验研究. 玻璃钢/复合材料. 2000 (5): 32-34

FRP Structures and FRP Composite Structures in Structural Engineering

Peng Feng Lieping Ye

Department of Civil Engineering, Tsinghua University

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) is a new kind of material for structural engineering in recent years. FRP structure and FRP composite structure are concerned in engineering gradually besides FRP repairing and strengthening the reinforced concrete structure. In this paper, the types of FRP for construction are listed, and their advantages and disadvantages are summarized and analyzed deeply. Applications and developments of some typical FRP structures and FRP composite structures, including all-FRP footbridges, FRP bridge deck systems, FRP long-span structure systems, FRP jacketed concrete elements, FRP-concrete composite beam and plate, are introduced in detail.

Keywords: FRP Structure, FRP Composite Structure, Bridge, Skeletal Structure

第一作者简介: 冯鹏, 1977年10月, 清华大学土木工程系博士研究生, 研究方向: FRP结构与FRP组合结构。