FRP 材料及结构在桥梁工程中的新应用

冯　鹏　　叶列平

（清华大学土木工程系，北京　100084）

摘要：纤维增强复合材料（FRP）是近年来在土木工程中开始应用的新型材料,它具有轻质、高强、耐腐蚀的显著特点，在桥梁工程中有着广阔的应用前景。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 FRP 斜拉桥索、FRP 夹心桥面体系、FRP 桥梁封闭系统等形式在桥梁工程中的最新应用。

关键词：FRP 结构，FRP 夹心桥面板，桥梁工程

1．　导言

FRP（纤维增强复合材料）是近年来在土木工程中应用日益广泛的一种新型的结构材料。它具有高强、轻质、耐腐蚀等显著优点，已经在结构的加固补强、围护防腐等方面得到了很好的应用。随着 FRP 材料的优越性能逐渐为工程界所认可，国外许多工程开始将它应用于新建的桥梁中，甚至是大跨度桥梁中。

从上世纪 70 年代开始，FRP 材料就开始在桥梁工程中尝试应用。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，当时大多采用的是 GFRP（玻璃纤维增强复合材料，即玻璃钢）。70 年代后期，我国也开始对 GFRP 进行研究。在 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 桥梁结构大多是尝试性质的，如表 1 所示。

表 1　桥梁工程中早期的 FRP 结构[1-3]

年代	地点	简介
1970	英国，利物浦	连续梁人行桥，跨径 10 米、宽 1.5 米，GFRP，造价为钢桥的 2 倍，重量为其 1/2
1972	以色列，特拉维夫	简支梁人行桥，跨径 24 米、宽 1.8 米，GFRP，自重 2.5 吨
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，仅限轻型车辆
1982	美国，阿肯色	简支梁人行桥，跨径 12.2 米、宽 0.9 米，GFRP,自重为钢梁的 1/3，用于腐蚀严重的环境
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，自重 9 吨,为钢梁的 1/4

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 材料及结构在桥梁工程中应用的形式也更加多样，如 FRP 人行桥梁、FRP 斜拉桥索、FRP 预应力筋、FRP 桥面板、FRP 桥梁围护体系、FRP 管混凝土桥柱等等。由于 FRP 轻质高强的优点，已经在桥梁工程中显现出广阔的应用前景。尤其是应用 FRP 材料实现传统材料难以达到的超大跨度桥梁颇受工程师和研究者的关注。

2．FRP 材料及产品

2．1　FRP 的种类

所谓复合材料是由增强材料和基体构成，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。

从生产工艺和产品形式上来分，目前在桥梁工程中常见的 FRP 产品有以下一些种类：(1) FRP 片材，包括 FRP 布和 FRP 板：主要用来粘贴在混凝土结构的表面对其进行加固补强；(2) FRP 棒材，包括 FRP 筋和 FRP 索：主要在 FRP 筋混凝土结构、FRP 预应力混凝土结构和桥索中替代钢筋和钢绞线；(3) FRP 网格材和 FRP 格栅：作为混凝土结构中的配筋或简易工作平台；(4) FRP 拉挤型材：截面形式灵活多样，力学性能好，用途广，是 FRP 结构应用的主要产品；(5) FRP 缠绕型材：主要用作 FRP 管混凝结构土，可以作为柱、桩，甚至梁，使构件性能大大优于普通钢筋混凝土；(6) FRP 夹层结构和蜂窝板：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，主要在梁和桥板中应用；(7) 还有一些其它工艺的 FRP 产品，如：模压产品、层压和卷管产品、热塑性成型产品以及手糊产品（低压接触）等等。

2．2　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出它的优势，克服劣势。

FRP 材料的主要优点有：

(1) 轻质高强。FRP 材料最突出的优点在于它有很高的比强度（极限强度/相对容重)，即通常所说的轻质高强。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[4,5]，并且可以减小地震作用的影响。

(2) 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。

(3) 良好的可设计性。与传统结构材料相比，这是 FRP 所独有的。工程师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。

(4) 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的结构比较有利。

(5) 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，有利于工程建设的工业化。

(6) 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。

但同时 FRP 材料还有一些缺点：

(1) 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。有关产品资料表明，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 构件时，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，这加大了设计难度。

（2）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 1/20～1/2，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。

（3）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。

（4）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。

（5）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。

FRP 材料还有一些值得注意的特点：

（1）大量的研究结果表明，FRP 材料本身的抗疲劳性能优于传统结构材料[6-8]。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还应进行深入研究。

（2）FRP 材料的耐久性也是很多学者关心的问题[9-12]。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。

（3）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%[5]。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[13]。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，近年来，CFRP 加固混凝土结构的应用即是例证。

3． FRP 在桥梁结构中的新应用

3．1 FRP 桥索

用 FRP 材料作为斜拉桥的桥索，可以充分发挥出 FRP 中纤维材料抗拉强度高、蠕变小而且耐腐蚀的优势。工程师们最先在人行天桥中进行了尝试。

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，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。

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。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 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，都开始修建应用 FRP 筋的桥梁结构，并进行了深入地研究。

1996 年，在瑞士建成了世界上第一座使用了 FRP 斜拉索的公路桥——Stork Bridge。这座桥为单塔（A 形）双索面体系，共有 24 根斜拉索，其中 2 根采用拉挤的 CFRP 筋集束成的索，其余为高强钢绞线。桥上双车道，全长 124m，跨过一个火车站。在 CFRP 索上安装了传感器，进行长期变形的监测。

这些工程都为 FRP 索在大跨度桥梁体系中应用进行了理论和工程的探索，充分证明了 FRP 材料在大跨桥梁中的应用的可行性和优越性。

3．2　FRP 桥面板

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。在桥梁中应用可以大大减轻恒载，使桥梁结构的跨度更大。

FRP 桥面板一般在工厂中加工成型，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，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 0.75～1.1kN/m^2，是传统桥面板的 1/3～1/4；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～L/1300，一次成型的夹心板的变形比粘贴成型的变形要小。

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。桥净跨 6.48m，宽 8.46m，设计荷载等级 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，现在已有几十座中小型桥梁采用了这种新型桥板。

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。

表2　国外已有的FRP夹心桥面板产品

产品	组成	厚度（mm）	自重(kg/m^2)
Duraspan	3向GFRP梯形截面拉挤型材和拉挤板粘接	127/195	62/91
Strongwell	单向纤维的GFRP拉挤方形管和平板粘接	120～203	90～112
EZSpan	3向GFRP正三角形截面拉挤型材和平板粘接	229	98
Superdeck	仿蜂窝状的正六边形拉挤型材和平板粘接	203	107
KSCI	接触低压成型GFRP夹心板，多向铺陈	127～610	76～100
Hardcore	真空辅助树脂传递模塑成型GFRP板，多向铺陈	152～710	98～112

1996 年后，美国有多家公司开发出了 FRP 夹心板体系，生产各种不同形式的 FRP 夹心桥面板，并且在实际工程中得到了很好的应用。近年，欧洲一些国家出资资助 FRP 夹心桥面板的开发与研究。短短不到十年时间，它就成为一种非常引人注目的结构形式。国外的工程中应用较多的产品在表 2 中列出。

目前，笔者所在的清华大学与北京玻璃钢研究院已经联合开发出了多种组合截面的FRP夹心桥面板产品，其中采用了CFRP、GFRP以及钢材，比全部采用GFRP的产品性能更好。另外还结合我国国情，开发出了FRP组合桥面板体系。

3．3　FRP 桥梁封闭系统

这是一种主要针对大型钢结构桥梁的系统，是用 FRP 拉挤型材组合成封闭的外壳，将桥面下原本暴露的钢梁围护起来，可以起到以下三个方面的效果。

（1）减少风阻。FRP 的封闭外壳可以按照合理的形状设计，从而有效地减少风阻，避免因大风引起桥体的振动。

（2）减少维护费用。FRP 外壳封闭系统的密封性好，阻止了内部钢结构周围空气的流动，并保持干燥，因而大大减少了大气对桥体钢结构的侵蚀，延长了大桥的寿命，钢结构表面油漆的标号和用量大为降低，并不再需要混凝土封面及相关材料，因而降低了成本，环境和安全性也大为改善。另外，FRP 封闭系统本身是一个大的检修平台，可以让检修人员和专用检修设备方便安全地进出。由于外壳封闭系统本身具有极强的耐腐蚀性，其第一次的维护期至少 30 年，使用寿命在 120 年左右。

（3）美观。FRP 外壳封闭系统把钢结构隐藏在内部，桥体下部拱腹平滑而流畅，并且有多种颜色可选，使整座桥更简洁、更美观，可以形成非常好的标志性景观。

这种 FRP 桥梁封闭系统最早是在 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。而后再英国许多桥梁中都开始使用这种封闭系统。我国南京的斯贝尔复合材料有限公司，在 2001 年也研制开发成功，设计荷载为 4.5kN/m^2，应用在我国港湾工程第三航道局承建的跨泰国第一大河眉南河上的巨型桥梁的封闭系统上，价格仅为国外产品的 1/2。

4．　结语

目前，FRP 材料在桥梁工程中的应用的研究还不够深入，主要体现在以下几个方面：

（1）耐久性研究；（2）长期持续荷载（蠕变）和反复荷载（疲劳）性能的研究；（3）FRP 构件连接性能研究；（4）FRP 结构在桥梁工程中的设计理论和方法的研究。

FRP 材料是新兴的结构材料，由它建造桥梁结构具有自重轻、施工方便、耐腐蚀、维护方便、维护费用低等优势，这将使 FRP 在桥梁工程中发挥出传统结构材料难以替代的作用，成为“奇兵”，在新世纪中将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.

[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] 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

[5] 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

[6] 邹祖讳 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

[7] 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

[8] 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

[9] 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

[10] 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

[11] 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

[12] H. A. Toutanji. Durability characteristics of concrete columns confined with advanced composite material. Composite Structure. 1999. Vol.44（2-3）：155-161

[13] 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

[14] 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

[15] 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

[16] 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

[17] 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

[18] 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