

文章编号: 1002-0268 (2004) 08-0059-05

复合材料桥面板的应用和研究进展

万 水¹, 胡 红², 周荣星²

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 东华大学纺织学院, 上海 200051)

摘要: 纤维增强复合材料 (FRP) 桥面板重量轻, 可大大降低桥梁上部结构的重量, 进而减轻下部结构的工程量。FRP 桥面板耐腐蚀, 抗疲劳和耐久性。它可大大减少建桥现场组装的时间, 降低建造成本, 节约维修费用, 使用寿命长。作为新一代桥梁承重结构, FRP 桥面板在桥梁建设和桥梁维修与改造工程中具有十分广阔的应用前景。本文介绍两类 FRP 桥面板-拉挤复合材料粘合结构桥面板和夹芯结构复合材料桥面板, 对已有的几种 FRP 桥面板产品性能进行分析, 介绍国内外在 FRP 桥面板的研制、工程应用和研究的进展状况。

关键词: 纤维增强复合材料; 桥面板; 应用技术

中图分类号: U443.31

文献标识码: A

Development and Application of FRP Bridge Decks

WAN Shui¹, HU Hong², ZHOU Rong-xing²

(1. Transportation College, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China;

2. College of Textile, Dong Hua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: FRP deck system reduces dead weight of the superstructure of the bridge and increases traffic load. It can achieve light-duty of the bridges, thus reduce the engineering work of the substructure. The advantages of applying FRP in bridge decks include its ease installation, corrosion resistance, fatigue endurance. It reduces building and maintenance costs and promises a longer lifespan. As a new kind of load-carrying member, FRP bridge decks have a promising future in the construction and rehabilitation of the bridge engineering. In this paper, two kinds of FRP bridge decks, adhesively bonded pull-extruded decks and sandwich decks, are introduced and their application and research development are also discussed.

Key words: FRP; Bridge deck; Application technology

0 引言

纤维增强复合材料 (FRP) 是一种新型结构材料, 具有比强度和比模量高、耐化学介质腐蚀、抗疲劳性和电绝缘性好等诸多优点, 近年来, FRP 桥面板结构的设计制造与应用技术成为桥梁工程中的一个研究重点^[1]。自 1975 年以色列建成世界上第一座纤维增强复合材料人行桥以来, 世界各桥梁技术发达国家都在将 FRP 桥面板作为新型的桥梁承重结构进行重点开发和研究^[2]。1996 年在美国的 Kansas 州 Russell 附近建造的 No Name Creek 公路桥首次应用 FRP 桥面板, 设计荷载 HS-20。此后, FRP 桥面板在美国发展

迅速, 现在已经有几十座中小型桥梁。目前美国已投资 0.45 亿美元进行工程 100 规划, 在 6 年期间用廉价的预制 FRP 桥面板修理俄州的 100 座普通桥梁。此工程在 1999 年接受了初期投资。Hardcore 复合材料公司采用真空辅助树脂传递模塑成型工艺 (VARIM) 制造了第一批 8 座工程 100 的桥面板, 继而国际复合材料中心与北卡州 MMC (Martin Marietta Composites) 公司签订协定为俄州制造 6 座新的复合材料待装配的桥面板。MMC 公司将提供其 DuraSpan 的 FRP 桥面板和工艺可能性。除了将 FRP 桥面板用于新建桥梁中以外, 它还被应用在老化桥梁的修理中, 即使用 FRP 桥面板替换原有的混凝土桥板, 使桥面结构自重减

轻, 车载等级提高, 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, 在重修中采用了这种 FRP 桥面板。

1 FRP 桥面板的结构、制造工艺及其应用

复合材料常用的增强材料包括玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维和硼纤维等, 几种常见的增强纤维性能参数见表 1。碳纤维、芳纶纤维和硼纤维虽然具有卓越的机械性能和理化性能, 但价格过于昂贵, 采用这些材料制造桥面板成本太高, 缺乏竞争力。而玻璃纤维虽然弹性模量较低, 但价格较低, 而且对大气、水和各种腐蚀介质的化学性能比较稳定。所以, 目前国际上通常采用玻璃纤维增强复合材料(既玻璃钢)制造桥面板^[3]。一般 FRP 桥面板产品的自重为 $0.75 \sim 1.1 \text{ kN/m}^2$, 是传统桥面板的 $1/3 \sim 1/4$, 价格为混凝土桥面板的 $3 \sim 4$ 倍, 为钢桥面板的 2 倍。在 HS-20 级荷载的作用下, 桥面板最大变形为 $L/450 \sim L/1300$ 。FRP 桥面板的基本结构形式主要有两种, 一种是夹芯板结构, 另一种是拉挤复合材料粘合结构^[1]。夹芯板结构的可设计性比较好, 可设计制造不同厚度、截面形状尺寸及不同强度要求的桥面板, 尤其是可以方便地形成组合结构。但这种结构存在生产成本较高, 结构的连接和固定性能差等缺点。拉挤复合材料可以连续生产, 具有生产效率高, 原材料浪费少, 整体性和截面形状一致性好, 型材长度不受限制等优点, 是目前国际上主要采用的桥面板结构形式。但生产拉挤复合材料的设备的初期投资十分昂贵, 且型材截面形状和尺寸受到设备限制。

表 1 常见的增强纤维性能参数

	玻璃纤维		芳纶		碳纤维		
	E-Glass	S-Glass	Kevlar 29	Kevlar 49	High Strength	High Modulus	Ultra-High Modulus
密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.60	2.50	1.44	1.44	1.8	1.9	2.0~2.1
模量/GPa	72	87	83/100	124	230	370	520~620
拉伸强度/GPa	1.72	2.53	2.27	2.27	2.48	1.79	1.03~1.31
断裂伸长/%	2.4	2.9	2.8	1.8	1.1	0.5	0.2

1.1 拉挤复合材料粘合结构桥面板

目前, 国外已经有多种不同截面形式的拉挤复合材料桥面板产品^[1], 主要产品及其性能见表 2。

表 2 中 L 表示跨度。从表中可以看出, 这几种拉挤复合材料桥面板的实测挠度都达到了设计要求。其中 Duraspan 桥面板由梯形截面的拉挤复合材料和面板粘结而成, 采用了 3 向 ($0 \pm 45^\circ$) 的 E 型玻璃纤维织

表 2 国外几种拉挤复合材料桥面板产品

产品名称	生产厂家	截面形状	厚度/mm	自重 $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	价格 $/\text{Dollars}\cdot\text{m}^{-2}$	挠度 (实测)	挠度 (HS20+IM 标准)
DuraSpan	Martin Marietta Composites		194	90	700~807	$L/450$	$L/340$
EZSpan	Altantic Research		229	98	861~1076	$L/950$	$L/950$
Superdeck	Creative Pultrusions		203	107	807	$L/530$	$L/530$
Strongwell	Strongwell		120~203	112	700	$L/605$	$L/325$

物; EZSpan 桥面板由正三角形截面拉挤复合材料和平板粘结而成, 采用了三维编织结构进行厚度方向增强; Superdeck 桥面板由双梯形/六边形拉挤复合材料粘结而成, 也采用了 3 轴向增强玻璃纤维织物 (图 1); Strongwell 桥面板由单向纤维增强的拉挤复合材料方管粘结而成 (图 2)^[1]。

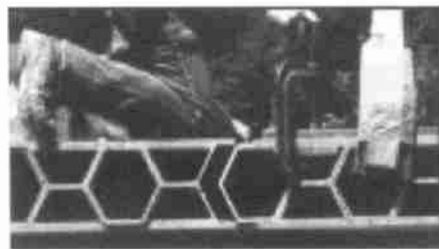


图 1 Superdeck 桥面板



图 2 Strongwell 桥面板

拉挤复合材料粘合结构桥面板产品性能可靠、强度高 (设计应变比 AASHTO 中规定的还小 20%)、自重轻 (约为混凝土桥板的 20%~40%)、截面低 (为混凝土板的 80%~90%)、有很好的抗疲劳和抗腐蚀性能、施工方便、安装快捷, 因此得到了广泛应用^[1]。目前, 在美国和欧洲已建成和在建的工程达 40 多项。采用 Duraspan 桥面板的沿俄亥俄州道 47 Ansonia 项目中 6 块 8 英尺宽, 46 英尺长的拉挤复合材料粘合结构桥面板用环氧-聚硫胶胶接并推合在一起, 接头的顶表面用 3 层三轴向增强织物和聚酯树脂密封。完成全部桥面板的安装用一台轻型吊车用了不到 6h。

2002 年 10 月在英国建成的 West Mill 桥, 是欧洲第一座复合材料高速公路桥, 也采用了粘合拉挤复合材料面板, 可以安全通过 34t 的坦克^[4], 见图 3 和图 4 所示。

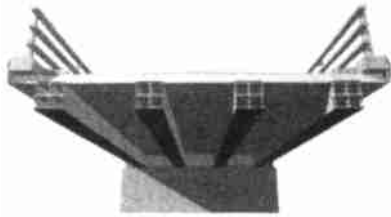


图 3 英国 West Mill 桥上部结构

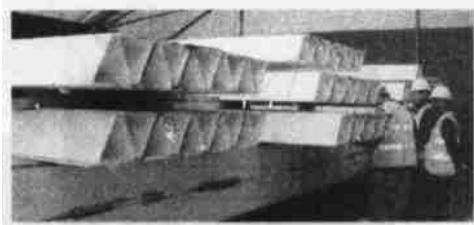


图 4 West Mill 桥的粘合拉挤复合材料面板

1.2 夹芯结构桥面板

FRP 夹芯板是由两层高强度复合材料面板与轻质的泡沫塑料芯层、木材芯层、铝材或 FRP 蜂巢芯层组成的一种既有较高的弯曲刚度和强度, 质量又很轻的结构物。面板放在芯层的外缘承受弯曲荷载, 轻而厚的芯层连接面板并承受剪切荷载。这种结构虽然存在生产成本较高, 结构的连接和固定性能差等缺点, 但是它的可设计性好, 能够根据载荷环境进行灵活设计制造, 比较适于制造各种不同特殊要求的桥面板。目前, 国际上开发了几种夹芯结构 FRP 桥面板, 并进行了推广应用。我国的 FRP 桥面板研制工作起步较晚, 目前已开发出 FRP 夹芯桥面板产品模型。

通常 FRP 夹芯桥面板采用的成型方法为开模成型和真空辅助树脂传递模塑成型, 其代表性产品及性能见表 3^[1]。

表 3 夹芯结构 FRP 桥面板产品及性能

产品名称及生产厂家	厚度/mm	自重/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	价格/ $\text{Dollars}\cdot\text{m}^{-2}$	挠度(实测)	挠度(HS20+IM 标准)
Hardcore Composites	152~710	98~112	570~1184	$L/785$	$L/1120$
KSCI	127~610	76	700	$L/1300$	$L/1300$

表 3 中 L 表示跨度。从表中可以看出, Hardcore Composites 桥面板的挠度未达到 HS20+IM 标准的设计要求。

No Name Creek 桥是世界上最早应用 FRP 夹芯桥面板的桥梁, 净跨 6.48m, 宽 8.46m, 设计荷载 HS-

20, 现场施工安装只用了 8h, 其桥面板产品是由 Kansas Structural Composites, Inc. (KSCI) 公司采用开模接触低压成型技术生产的蜂巢芯层夹芯桥面板(图 5)。在 Kansas 州 K126 线上的 2 座桥梁也采用了这种结构的桥面板, 其芯层为正弦波形腹板交替的垂直腹板结构, 采用短切原丝毡, 面板采用 E 玻璃纤维织物。

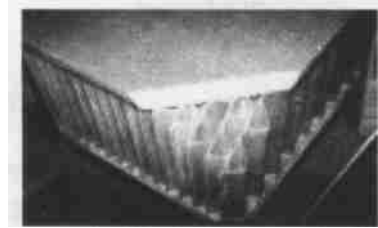


图 5 KSCI 夹芯桥面板

纽约州 1998 年建成的 Bennetts Creek 桥, 采用了 Hardcore Composites 公司的真空辅助树脂传递模塑成型的 FRP 桥面板(图 6)。Bennetts Creek 桥设计符合 AASHTO HS25 荷载等级(即 45t)。面板路面高 24 英寸, 分成 2 部分, 每块 16.5 英尺 $\times$ 25 英尺, 有一斜交角(即桥端和路中心线间夹角)为约 30° 。每块整体夹层结构板用手工铺设, 用一层薄的树脂分布网眼膜, 接着用多层由 BTI 供应的干的、滚压粘合的 E 玻璃纤维织物。钢模具由侧边壁和底板组成。芯层用 E 玻璃纤维织物包裹闭孔聚异氰酸泡沫块制造, 然后将预浸料坯部件用 DERAKANE 乙烯基树脂进行浸渍。在运到现场前涂敷 3/8 英寸厚的聚合物混凝土到桥面板表面。AASHTO 的挠度规定为 $L/800$, 而在 90t 荷载下此桥中心线处测得最大挠度仅 1/8 英寸, 大大优于 AASHTO 规定的要求 0.345 英寸。图 7 显示了 Hardcore 夹芯桥面板的现场组装情况。

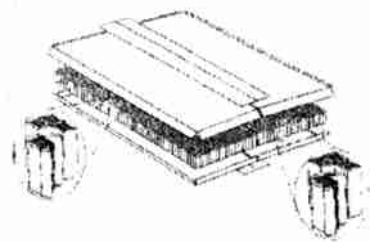


图 6 Hardcore 夹芯桥面板

2 FRP 桥面板的研究进展

在 FRP 桥面板的研制和工程应用方面, 美国和欧洲等发达国家处于先进水平。目前正在进行大规模的推广研究和深入研究工作。研究工作集中在以下几个方面:

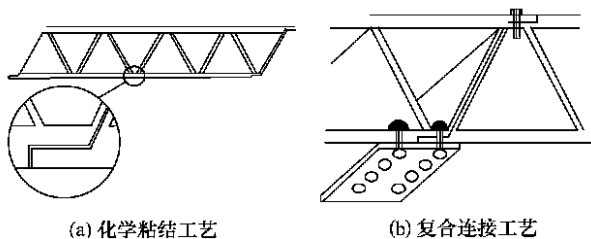


图 7 Hardcore 夹芯桥面板的组装

(1) FRP 桥面板的结构设计理论和规范。由于 FRP 材料与传统的结构材料的力学性能有很大的不同, 主要体现为线弹性、各向异性, 材料组成复杂, 可设计性强。FRP 结构和 FRP 组合结构的设计与传统的结构设计方法有很多不同, 它的设计包括材料设计和结构设计两部分, 它们相互联系紧密, 不能采用等代替传统材料的方法进行设计。目前, 国际上还没有公布过针对 FRP 桥梁结构的设计规范。美国土木工程师协会 (ASCE) 正在制定 FRP 拉挤型材结构的设计标准。它将被用于美国公路与交通局 (AASHTO) 制定的 FRP 结构设计规范中。

(2) FRP 桥面板的生产工艺的研究。由于玻璃钢材料具有弹性模量低和各向异性等特点, 简单地使用玻璃钢材料制造桥面板不易满足高性能、低成本的要求。因此, 将不同种类的 FRP 材料及传统结构材料进行合理的组合, 开发出经济实用的新型 FRP 组合桥面板是目前国内外主要的研究领域之一。

(3) 连接技术研究。目前, 常用的 FRP 桥面板连接固定的方式是金属螺栓连接、化学粘结及两者的结合, 如图 8 所示。对于 FRP 桥面板的连接工艺设计、连接强度和失效形式分析是当前复合材料桥梁领域的研究热点之一。



(a) 化学粘结工艺

(b) 复合连接工艺

图 8 复合材料桥面板连接工艺

(4) FRP 桥面板结构的动力特性与稳定性研究。FRP 研究桥面板模态特性和阻尼特性; 建立 FRP 桥面板的有限元模型, 分析在车辆作用下, FRP 桥面板的动力响应特性。研究 FRP 夹芯桥面板的整体弹性失稳和局部皱曲失稳。

(5) FRP 桥面板的承载能力与损伤机理研究。研究实践表明, 对于玻璃钢桥梁上部结构的承载能力受

结构的刚度和局部屈曲控制。目前常采用 FRP 桥面板的 FEM 建模, 研究在车载作用下, 桥面板结构抗弯特性, 变形和应力分布特点, 优化 FRP 桥面板几何参数, 提高结构的抗弯刚度和强度。英国研制 West Mill 桥时, 进行了 FRP 桥面板的截面设计与优化研究^[5]。

(6) FRP 桥面板的抗疲劳性能研究。目前许多 FRP 产品供应商都通过疲劳试验来验证自己的产品疲劳寿命。试验表明 FRP 桥面板结构具有良好的耐疲劳特性。2000 年, 在美国 New Hampshire 州 Hanover 的寒区研究与工程实验室 (CRREL) 与多所大学合作, 对不同的 FRP 桥面板进行了疲劳试验。试验结果表明, 在很大的温度变化范围内, FRP 桥面板都具有很好的抗疲劳性能。

(7) FRP 桥面板的湿热效应研究。研究当温度和湿度发生变化时, 聚合物基体纤维增强复合材料中由于纤维和基体的热膨胀系数和吸湿量不同而产生的微观湿热应力, 复合材料板内产生的残余应力和湿热变形。

(8) FRP 桥面板铺装材料研制和铺装技术研究。FRP 桥面板要承受载重车辆通过车轮施加的巨大荷载, 由于车轮与桥面板的接触面积小, 局部压力很大。铺装层对于分散荷载, 提高 FRP 桥面板的局部承压能力, 避免发生局部屈曲和塌陷、避免阳光直射和顺利排水, 都具有重要的作用。

(9) FRP 桥面板结构的老化机理、防护方法和使用寿命预测研究。耐久性不仅仅是材料老化, 还包括阳光、大气、温度、湿度等变化的影响、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, 国内外对这个方面的研究都还不够深入。

FRP 桥面板重量轻, 可大大降低桥梁恒载, 提高有效承载力, 并使基础工程在内的下部结构工程量减少, 是解决桥梁结构轻型化问题的一个十分有效的途径。虽然 FRP 材料价格比传统材料高, 但 FRP 桥面板自重的减轻会使桥梁下部结构的造价减少; 用它建造桥梁结构具有自重轻、施工方便优势, 这是传统结构材料难以比拟的; 它耐腐蚀, 消除了混凝土板具有的开裂、钢筋锈蚀等问题, 节约了维修和防护费用; 它具有良好的抗疲劳、抗震和耐久性, 使用寿命长; 可在工厂中模块化生产, 对环境的破坏小, 运输吊装方便, 可大大减少建桥现场组装的时间, 降低建造成本。从结构整个生命周期的费用来看, FRP 桥面板是非常具有竞争优势的, 尤其在一些工作环境恶劣的地

方。以美国的短跨桥梁为例, FRP 桥面板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 $1/2$ 。FRP 桥面板施工速度快, 减少了桥梁维修和改造作业对高速公路运营的影响, 降低了成本, 可获得巨大的经济效益和社会效益。工程测算表明, FRP 桥面板系统可比传统材料的桥面板节约成本 $17\%^{[9]}$ 。作为新一代桥梁承重结构, FRP 桥面板在桥梁建设和桥梁维修与改造工程中具有十分广阔的应用前景^[7]。2002 年在法国巴黎举行的 37 届 JEC (Journals and Exhibitions on Composites) 国际复合材料展览会上, 展出了 FRP 桥面板, 体现了国际上将复合材料应用于桥梁工程等基础设施工程中的发展趋势。

参考文献:

- [1] Bakis C E, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction- State-of-the-Art Review [J]. Journal of Composites for Construction,

ASCE, 2002 6 (2): 73-87.

- [2] Benjamin Tang, Wanlter Podolny. A Successful Beginning for Fiber Reinforced Polymer (FPR) Composite Materials in Bridge Applications [J]. Orlando, FL USA: Federal Highway Administration (FHWA) Proceedings, International Conference on Corrosion And Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998-12: 7-11.
- [3] Michael D. Hayes et al. Performance of Tube and Plate Fiberglass Composite Bridge Deck [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000 4 (2): 48-55.
- [4] Sam Luke Building West Mill Bridge in Reinforced Plastics [J]. Reinforced Plastics, 2003, 47 (1): 26-30.
- [5] L Canning, J Hodgson, A Jaman, R Kanuna, S Luke. The Analysis Design and Optimisation of an Advanced Composite Bridge Deck [C]. Mouchel Consulting Limited, 2002.
- [6] 孔庆宝. 复合材料在基础设施工程中开发应用和技术研究[J]. 纤维复合材料, 2002 (2).
- [7] Aixi Zhou, John J Lesko, Julio F Davalos Fiber Reinforced Polymer Deck for Bridge Systems [C]. Tampa, FL USA: Composites 2001 Convention and Trade Show Composites Fabricators Association, 2001 (10).

(上接第 55 页)

母降落在外螺纹球托上、凹凸构造分离, 撤掉牵引绳、注入润滑脂、顶端用螺栓封孔、底端加密封保护罩后完成旋入式拉索冷铸锚具的安装。

3 转动式拉索锚具的比较与应用选择

作为应用在最关键部位的拉索锚具, 设计时都按较高的安全度进行设计与校核, 锚具的零部件加工均应在工厂内完成, 使锚具的加工质量能够得到保证, 确保转动式拉索锚具的使用安全。

桥梁构造不同, 对拉索锚具有不同的要求, 在实际设计应用时可按以下几点进行:

- (1) 对于桥道纵向位移大, 横向偏摆距离小的状况, 可采用销接式、球铰式或旋入式转动锚具。
- (2) 对于桥道纵向位移及横向偏摆均不很大的状况, 则上述几种转动锚具均可应用。
- (3) 桥道纵向位移及横向偏摆均较大或者施工时拱肋内预埋孔与横梁内预埋管位置偏差比较大的状况, 可应用球铰支座式、球铰式或旋入式拉索锚具。
- (4) 对于斜拉桥来说, 一般拉索都比较大而且长, 振动也比较剧烈, 可采用球铰支座式拉索冷铸锚具或销接转动锚具。

当吊杆拉索较短时, 为了使拉索更加简洁美观, 建议采用刚性拉杆替代半平行钢丝束拉索。此外, 由于吊杆拉索的上下端锚具相对独立, 设计时可根据实际情况进行组合应用, 如上端为球铰支座式, 下端为销接式等。

4 结语

中、下承式拱桥和斜拉桥的断索问题可以通过转动式锚具来解决, 本文介绍的销接式锚具、球铰支座锚具、球铰式锚具、旋入式锚具都能大大减小拉索弯折幅度, 提高拉索疲劳寿命和避免拉索防腐构造过早失效。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] 严国敏. 现代斜拉桥 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
- [3] 王文涛. 斜拉桥换索工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [4] 高小云, 杨岳民. 大跨度斜拉桥拉索系统的疲劳评定 [J]. 国外桥梁, 1999 (4).