

FRP 夹心桥面板及新型 FRP 组合桥面板

冯 鹏 叶列平

(清华大学土木工程系 北京 100084)

摘要：FRP (纤维增强复合材料) 是一种新型的结构材料, 它具有轻质、高强、耐腐蚀的显著特点, 应用这种材料制成的夹心桥面板具有传统桥面板难以比拟的优点。本文介绍了国内外 FRP 夹心桥面板的研制应用的情况, 并提出了 FRP 组合桥面板的概念, 从而得到性能更好、价格便宜的新型 FRP 组合桥面板。

关键字：桥面板, 桥梁上部结构, 拉挤, 组合结构

1. 引言

在公路桥梁中, 桥面板直接承受轮压荷载和环境荷载, 是受超载、腐蚀、疲劳等不利因素影响最直接的构件。因此, 传统的钢筋混凝土桥面板和正交异性钢桥板在一些恶劣的环境下会很快锈蚀、开裂、剥离, 甚至塌陷, 这些给道路交通带来巨大的隐患和损失。

FRP 材料是一种新型结构材料, 具有高强、轻质、耐腐蚀等优点。用 FRP 制成的夹心桥面板与传统的桥面板相比有明显的优势, 它的出现为桥梁工程师提供了一个很好的选择。

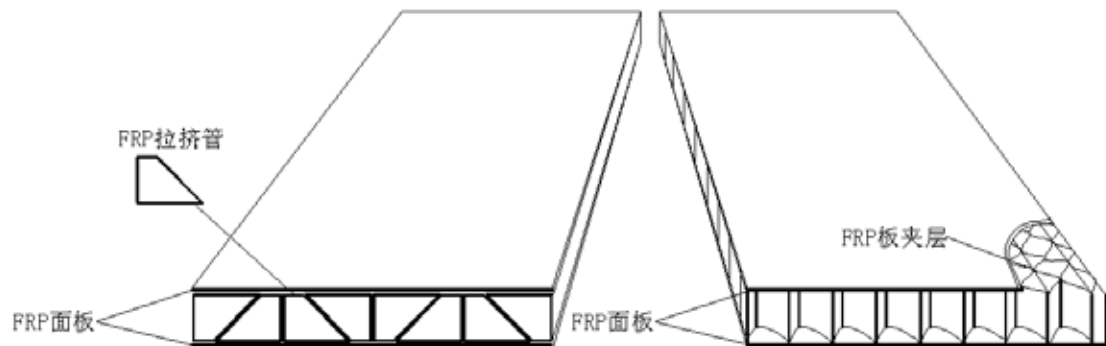


图 1 FRP 夹层桥面板

FRP 夹心桥面板由上下的 FRP 面层和 FRP 夹层粘接而成, 如图 1 所示。上面层受压和下面层受拉承受弯矩, 夹层部分主要承受剪力, 同时连接上下面层。根据 FRP 夹层板的生产工艺, 可以分为拉挤粘接 (图 1 中左侧) 和接触工艺一次成型 (图 1 中右侧) 两类。这种组合可以使 FRP 材料的强度充分发挥, 同时减轻也了结构的重量。这种桥面板不仅可以直接应用在新建桥梁中, 还可以替换一些老桥原有的混凝土桥板, 使老桥重新焕发青春, 甚至提高荷载等级。1996 年, 美国开始在中短跨桥梁中应用 GFRP (玻璃纤维) 夹心桥面板, 至今已经有近百座桥梁, 其中有 1/3 为老桥修复。

近年我国基础设施建设规模逐年增大, 对于建设水平和质量的要求也越来越高, 其中高性能、高效率、耐久性好是工程结构的迫切要求。FRP 桥面板正是适应这一要求的产品, 它

具有以下一些显著的优点。

(1) 自重轻。FRP 夹心桥面板的自重约为传统混凝土桥板的 20~40%^[1]。使用它可以大大减轻桥面恒载,使桥梁的跨度可以更大,车载可以更高。

(2) 施工方便。FRP 夹心桥面板在工厂中加工生产,现场安装,它的重量轻,甚至可以不用起重设备,因此运输、安装都非常方便,可以大大缩短工期。

(3) 耐腐蚀,维护方便,维护费用低。目前我国许多桥梁结构都受到锈蚀等问题的困扰,许多工程建成后的维护费用都大大超过了建设费用。而 FRP 材料具有很好的耐腐蚀性,建成后几乎不需任何维护措施,这对于一些特殊环境地区的桥梁建设无疑是一个福音。

这三个优势将使 FRP 夹心桥面板在桥梁工程中发挥出传统结构材料难以替代的作用。

同时,与其它的结构材料一样,FRP 材料也有一些缺点。首先,FRP 材料的弹性模量低。构件的变形成为全 FRP 桥面板的主要控制因素。FRP 夹心桥面板必须通过增大构件几何尺寸来获得几何刚度,从而提高整个构件的刚度,材料的用量势必增大。另一个问题是 FRP 材料的价格相对较高,使用 FRP 夹心桥面板的费用大约是混凝土桥面板的 2~3 倍,是正交异性钢桥板的 1.2 倍^[1]。虽然从整个桥梁生命周期中的总费用来看,FRP 夹心桥面板在经济性上并不差^[2],但是较大的初期投资势必会影响 FRP 桥面板体系在工程中应用的前景。因此,改进现有的 FRP 夹心桥面板,研究开发出成本低、性能好的 FRP 桥面板体系是非常需要的。

我国在这方面的研究起步相对较晚,目前还没有的定型 FRP 桥面板的产品。但随着工程建设的发展,成本低、性能好的 FRP 桥面板将会在桥梁工程中有很大的需求量。清华大学土木工程系与北京玻璃钢研究设计院正在联合开发适合中国国情的 FRP 夹心桥面板以及成本低、性能好新型 FRP 组合桥面板。

2. FRP 夹心桥面板

目前,国外已经有多种不同断面形式的 FRP 夹心桥面板产品。一般在工厂中按照一定的模数尺寸加工成型,再运到现场安装。常用的连接固定的方式是金属螺栓连接和粘接。

这些 FRP 桥面板产品的自重为 0.75~1.1kN/m²,是传统桥面板的 1/3~1/4;单位价格为混凝土桥面板的 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接成型板的变形要小一些。

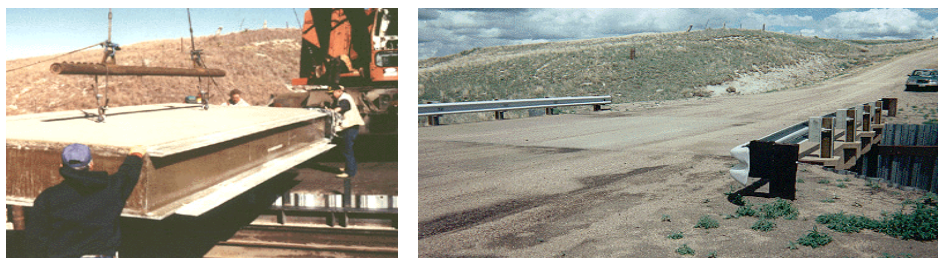


图 2 最早的 FRP 桥面公路桥(美国, Kansas)

世界上最早应用 FRP 夹心桥面板的是 1996 年在美国 Kansas 州 Russell 附近的无名沟壑上架起的一座公路桥,见图 2。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，产品由 KSCI (Kansas Structural Composites, Inc.) 提供。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，FRP 夹心桥面板在美国发展迅速，现在已经有几十座中小型桥梁。除了用 FRP 桥面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，重新采用了这种 FRP 桥面板，从而使老桥重新焕发青春。目前应用较多的产品主要有下面一些。

2.1 Duraspan

此产品由 Martin Marietta Composites 公司生产，有两种规格，如表 1 所示。

表 1 MMC 的 Duraspan 产品

产品规格	厚度	自重	允许梁间距最大值
DuraSpan 500	5.00"(127mm)	13 p.s.f. (0.62 kN/m ²)	5" (1.52m)
DuraSpan 766	7.66"(195mm)	19 p.s.f. (0.91 kN/m ²)	10"(3.05m)

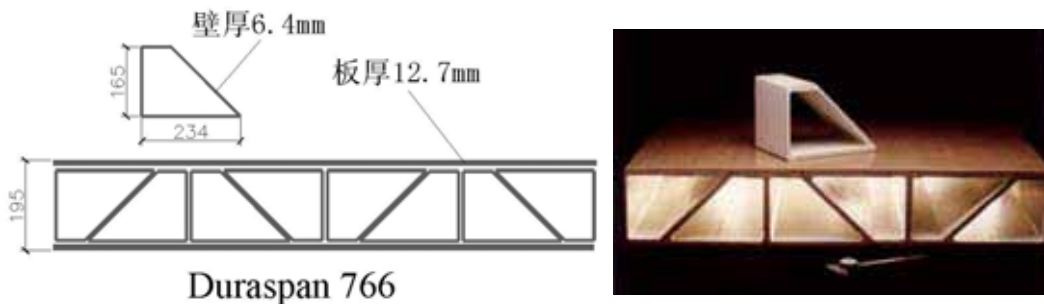


图 3 Duraspan 的组成

它们由梯形截面的拉挤型材和拉挤板粘接而成，如图 3 所示。其中采用了 3 向(0°,±45°)的 E 型玻璃纤维。在工厂中加工成型，现场安装在钢梁（通过螺栓）或混凝土梁（通过预埋钢筋）上。在螺栓或钢筋位置，板的上表面需要开孔，最后在开孔位置灌胶粘布补强。

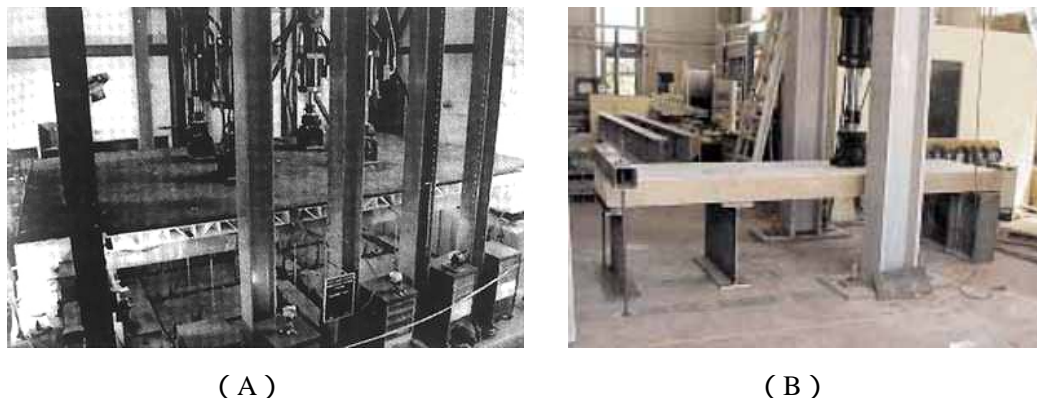


图 4 Duraspan 的试验

美国加州大学圣地亚哥分校 (University of California, San Diego) 的学者对该产品进行了 2,000,000 次的疲劳试验和静载破坏试验^[3]，如图 4 (A)。足尺的双跨连续板，表面有 1” (25.4mm) 厚的沥青铺装层。首先进行了静力加载试验，获得了构件的刚度，在 2,000,000

次疲劳试验后，没有刚度的降低。静力加载破坏试验，最大轮压达到 479 kips (2,131kN)，上面板局部压屈。他们还应用这个桥面板与填充混凝土的 CFRP 管结合，形成了 FRP 夹心板 - 混凝土组合的桥梁上部结构体系。

特达华大学 (University of Delaware) 进行了 10,500,000 次的疲劳试验和横向的静力试验，如图 4 (B)。足尺的不等跨连续板，按照实际连接方式固定在钢梁上，模仿轮压进行疲劳试验。经过 10,500,000 次 (相当于 AASHTO 规定的 75 年使用寿命) 循环加载，连接处没有明显破坏，整体刚度没有很大的变化，跨中有很小的剥离和裂缝。试验都是按照 HS20 的荷载进行，试验中最大的变形为 $L/450$ 。

这种产品性能可靠、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，因此在美国得到了广泛应用，有 20 多座桥梁中建成，其中第一座就建造在加州大学圣地亚哥分校的校园里。

2.2 Strongwell 公司的产品

Strongwell 公司生产的 FRP 桥面板也是完全采用拉挤型材粘贴而成。所不同的是，它由单向纤维的拉挤方形管和平板组成，如图 5 所示。板的厚度可以方管的尺寸变化而变： $120 \sim 203\text{mm}$ ，自重为 $90 \sim 112\text{kg/m}^2$ 。

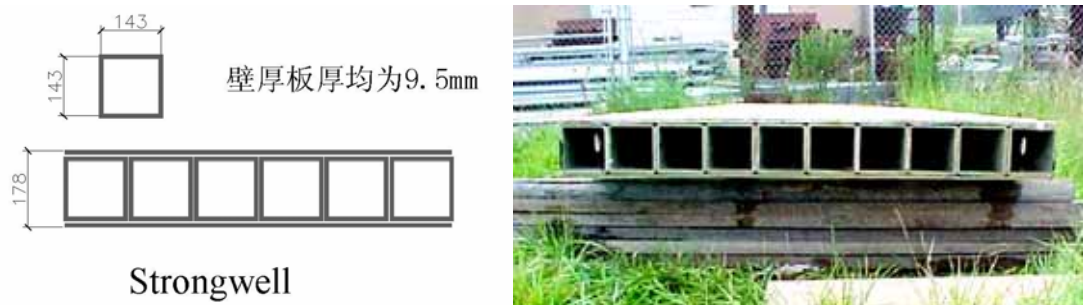


图 5 Strongwell 生产的 FRP 桥面板组成

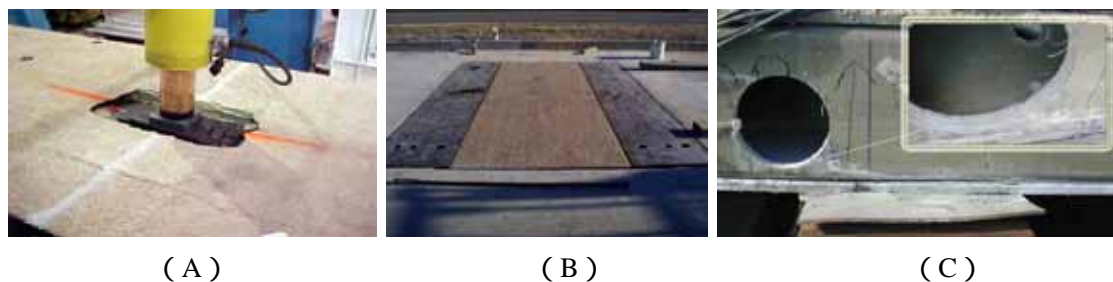


图 6 Strongwell 产品的性能试验

弗吉尼亚的学者对 Strongwell 的产品性能进行了研究，进行了静力和现场的动力试验^[4]。静力试验是在试验室内完成的，仿照轮压的冲击荷载加载，在最大变形达到 $L/467$ 时，局部冲切破坏，如图 6 (A)。现场的试验是在一条公路上完成的，如图 6 (B)。在 8 个月里进行了 4,000,000 次的加速疲劳试验，最终在连接处出现裂纹，但刚度没有太大的变化，如图 6 (C)。Strongwell 的桥面板在美国国内的工程有 10 多处。

2.3 其它国外公司的产品

还有一些其它公司的产品，如表 2 所示。

表2 部分国外公司的FRP夹心桥面板产品

产品	组成	厚度 (mm)	自重(kg/m ²)
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，图7	203	107
KSCI	接触低压成型GFRP夹心板，多向铺陈，图8	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

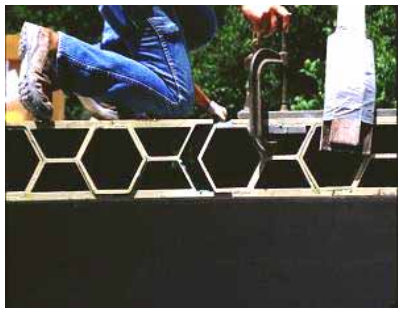


图 7 SuperDeck

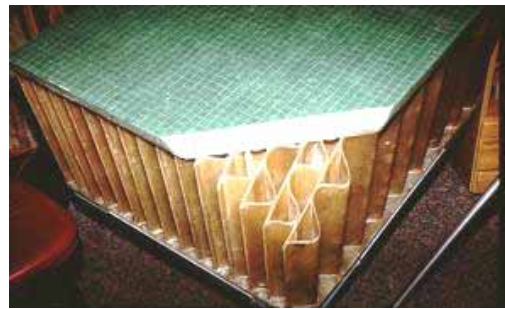


图 8 KSCI 的 FRP 桥面板产品

2.4 清华大学与北京玻璃钢研究设计院的产品——FD

FD 是清华大学与北京玻璃钢研究设计院共同开发的 FRP 夹心桥面板 (FRP Sandwich Deck) 产品。目前是第一代产品，由 FRP 拉挤生产的方管、槽型材和层叠板组成，如图 9 所示。桥板厚度为 170mm，自重为 84kg/m² (63kg/m)。

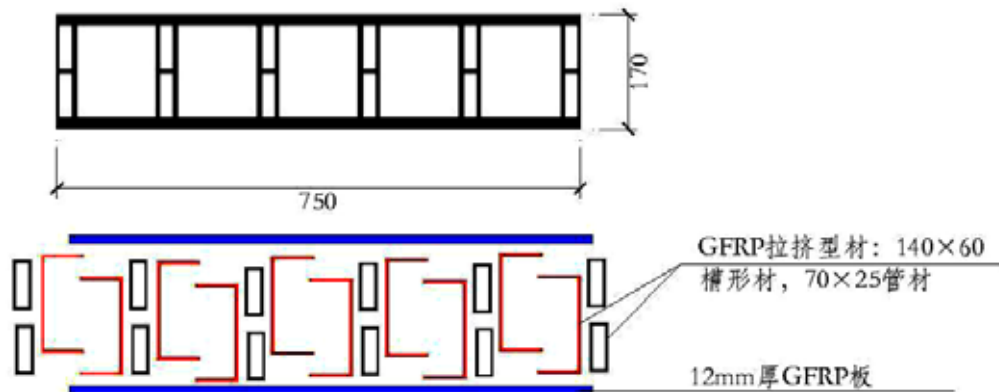


图 9 清华大学与北京玻璃钢研究设计院的产品——FD

FD 的断面上有一个双室腹板，提高了局部的稳定性能，也为构件的连接安装提供了方便，同时也使构件整体性能有较大的改善。

用有限元分析程序取 1/2 模型，按照各项异性材料对 FD 的受力性能进行分析，获得桥面板的变形和承载力，如图 10 所示，(A) 为简支板模型计算结果，(B) 为连续板模型计算结果。如果限制桥板跨中变形小于 $L/600$ ，则对于汽 - 超 20 级荷载，简支最大支承梁的间距为 1.5m，连续板最大支承梁的间距为

3. 新型 FRP 组合桥面板

由于 FRP 材料有弹性模量低、各向异性、价格较高等缺点，简单的全 FRP 夹心板很难满足高性能、低成本的要求。因此，我们将不同种类的 FRP 材料及传统结构材料（钢材和混凝土）进行受力合理的组合，研究开发出经济实用的新型 FRP 组合桥面板。新型 FRP 组合桥面板的组合概念主要体现在下面三个方面。

3.1 不同种类 FRP 材料的组合

FRP 材料中纤维的种类繁多，性能差别较大。目前 FRP 桥面板多数采用的是价格便宜、性能普通的 GFRP 型材，如果将强度高、模量高的 CFRP（碳纤维）布粘贴在桥面板的受拉区表面和应力较大的局部，与 GFRP 共同工作，会使整个桥板的极限承载力和刚度有很大的改善。

3.2 FRP 材料与钢材组合

通过 FRP 制造工艺的改进，可以将钢筋或型钢包裹在 GFRP 型材中，使它们共同受力，形成理想的组合材料。钢材会提高 FRP 材料的模量，改善 FRP 型材的受力性能。组合后的荷载应变关系曲线为双折线，图 11 所示。

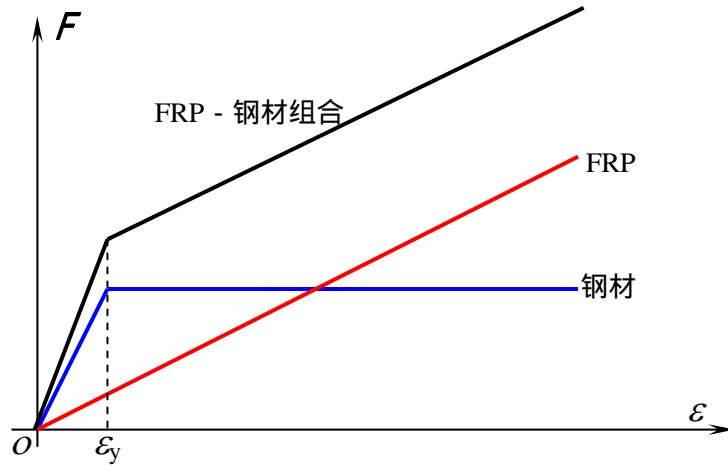


图 11 FRP - 钢材组合构件的荷载应变关系曲线

$$\begin{aligned} \varepsilon < \varepsilon_y, E_{FS} &= \alpha E_F + \beta E_S & \alpha &= A_F / (A_F + A_S) \\ \varepsilon \geq \varepsilon_y, E_{FS} &= \alpha E_F & \beta &= A_S / (A_F + A_S) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sigma_{FS} = E_{FS} \varepsilon \quad (2)$$

$$F = F_F + F_S = E_{FS} \varepsilon (A_F + A_S) , \quad (3)$$

式（1）为弹性模量计算式，式（2）为应力应变关系，式（3）为荷载应变关系。组合后的材料具有较高强度和弹性模量，也有一定的塑性变形能力，还可以减少 FRP 材料的蠕变。同时，FRP 材料保护了钢筋，避免了锈蚀破坏，可谓是一举多得。

3.3 FRP 材料与混凝土组合

在施工中,用带有 T 型肋的 FRP 空心板作为底模板,表面浇筑混凝土,如图 12 所示。投入使用后,混凝土受压而 FRP 受拉,共同承受荷载。这样的组合形式拥有了 FRP 结构的优点,也降低了成本,是一种合理的 FRP 组合结构形式。

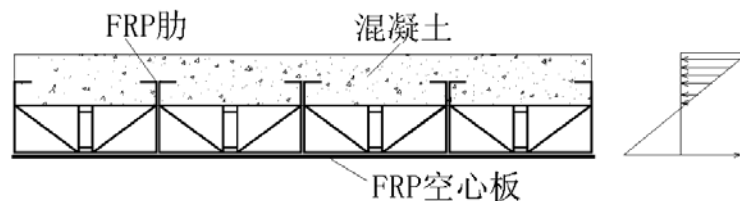


图 12 FRP 组合桥面板构造

这三种组合的概念将在新型 FRP 桥面板产品中同时使用,使它具有很好的力学性能、施工性能、耐久性和经济性,从而形成 FRP 桥面板体系,包括下面 8 种:

- (1) FRP 夹心桥面板 (FRP Sandwich Deck), 为 FD;
- (2) 底部用 CFRP 布加强的 FD, 为 FDC;
- (3) FRP - 混凝土组合桥面板 (FRP-Concrete Hybrid Deck), 为 FCD;
- (4) 底部用 CFRP 布加强的 FCD, 记为 FCDC;
- (5) 加有钢材的 FRP 夹心桥面板 (FRP-Steel Hybrid Deck), 为 FSD;
- (6) 底部用 CFRP 布加强的 FSD, 记为 FSDC;
- (7) 加有钢材的 FRP 型材与混凝土组合 (FRP-Steel-Concrete Hybrid Deck), 为 FSCD;
- (8) 底部用 CFRP 布加强的 FSCD, 记为 FSCDC。

4. 结语

FRP 材料是新兴的结构材料,用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”,FRP 夹心桥面板和 FRP 组合桥面板必将在新世纪中得到广泛的应用。然而,目前国内相应的科研开发工作还不够深入,工程师对于这种新材料的认识也还不够,需要在以下几个方面做更多的工作。

(1) 耐久性,以及长期持续荷载(蠕变)和反复荷载(疲劳)性能的研究。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。国内外对这个方面的研究都还不够深入。

(2) FRP 构件的设计方法的研究。由于 FRP 材料与传统的结构材料的力学性能有很大的不同,最主要体现为线弹性、各向异性和弹性模量低,不能采用等代替换传统材料的方法

进行设计，FRP 材料应该有适合自己特点的设计理论和准则。目前世界上针对结构工程的 FRP 结构或 FRP 组合结构的设计规范或指南还很少。此外，FRP 材料组成复杂，可设计性强，因此 FRP 结构和 FRP 组合结构的设计与传统的结构设计方法有所不同。它的设计包括材料设计和结构设计两部分，它们紧密联系。目前，它们是由复合材料设计师和结构工程师分别完成的，而两者对对方的领域知之甚少。因此，工程师之间充分的交流是设计出优秀的 FRP 结构和 FRP 组合结构的重要前提。同时对这两个领域都有深入了解的 FRP 结构设计人员也是非常急需的。

(3) FRP 桥面板产品的推广应用。由于大多数工程师对 FRP 材料比较陌生，而且对较高的价格难以接受。而实际上，从初期造价来看，FRP 桥面板自重的减轻会使桥梁下部结构的造价减少；从结构整个生命周期的费用来看，FRP 桥面板更有优势，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。另外，由于 FRP 桥面板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 加固混凝土结构的广泛应用既是例证。因此，让更多的桥梁设计人员认识到这一点也是非常紧迫的。

参考文献：

- [1] Aixi 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
- [2] 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
- [3] R. Burgueno. System characterization and design of modular fiber-reinforced polymer (FRP) short- and medium-span bridges. Thesis of PhD. University of California, San Diego. 1999
- [4] A. B. Temeles. Field and Laboratory Tests of a Proposed Bridge Deck Panel Fabricated from Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Component. Thesis for MS in Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University. 2001
- [5] 中华人民共和国交通部部标准. 公路桥涵设计通用规范 (JTJ021-89). 人民交通出版社. 1989
- [6] 沃丁柱等编. 复合材料大全. 化学工业出版社. 2000