维普资讯 http://www.cqvip.com

Vol.21 No.4 公 路 交 通 科 技 2004年4月
JOURNAL OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION RESEARCH AND DEVELOPMENT

文章编号：1002-0268（2004）04-0059-04

FRP材料在大跨度桥梁结构中的应用展望

张元凯，肖汝诚
（同济大学，上海 200092）

摘要：近年来，纤维增强复合材料（FRP）具有的高强、轻质、耐腐蚀等显著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。本文分析了FRP材料的特点以及与传统材料相比的突出优点，特别分析了FRP材料用于大跨度斜拉桥或悬索桥时，可以使结构的极限跨径有很大的提高，可以为一些特大跨径桥梁的设计提供新的思路。本文同时也对FRP材料的一些不足进行了分析。

关键词：纤维增强复合材料；大跨度桥梁
中图分类号：U444 **文献标识码**：A

Application of FRP Material in Long Span Bridge

ZHANG Yuan-kai, *XIAO Ru-cheng*
(Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper describes the material characteristic of FRP and the application example of FRP in long span bridge. First, mechanical properties such as high strength, light weight and high corruption resistance are investigated and compared with other materials. Then the application of FRP in long span bridge is introduced. It is analyzed that how the extreme span can be enlarged when the FRP material is adopted in cable-stayed bridge or suspension bridge. Some disadvantages of FRP which should be researched further are also illustrated. Then, a long span bridge scheme in which the FRP are applied is reported in terms of design and construction of carbon-fiber cable, in which the advantages of FRP can be seen.

Key words: Fiber reinforced plastics; Long span bridge

0 绪论

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。1982年，北京密云县建成了单跨20.7m的简支梁公路桥，1988年，在重庆建成了单跨26m的人行天桥。

在直布罗陀海峡建造连接欧非大陆的复合材料斜拉桥（主跨8 400m）的构想提出后，在世界范围内掀起了将FRP应用于超大跨桥梁结构体系（主要是斜拉桥体系与悬索桥体系）的热潮。中国于1986年建成第一座主跨27.4m的玻璃钢（GFRP）斜拉人行桥；英国于1992年建成又一座主跨63m的玻璃钢斜拉人行桥，瑞士联邦材料实验室（EMPA）完成了碳纤维增强塑料（CFRP）拉索的室内静动力试验；美国加州大学用缠绕方法制造出混杂复合材料缆索，准备用其替换长滩（Dmond）桥上80根拉索中的4根；德国BASF公司还设想用CPRP拉索建造100m跨径的桥梁，如此等等。复合材料用于斜拉桥的新兴势头可见一斑。在直布罗陀海峡窄处建造碳纤维增强塑料斜拉桥的建议方案，即是在斜拉桥的发展中采用这种高强材料的一个信号，又是对整个桥梁工程界的一次挑战。最近，日本的

收稿日期：2003-03-11
作者简介：张元凯（1975-），男，四川仪陇人，博士研究生，研究方向为大跨度桥梁.

维普资讯 http://www.cqvip.com

工程师提出了用FRP材料建造主跨为5 000m的悬索桥方案,并对结构体系、空气动力稳定性能进行了研究,使方案的可行性大大增强。本文拟对复合材料用于大跨度桥梁的结构进行了一些探讨。

1 FRP材料的特点

FRP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),常见FRP材料与结构钢材的力学性能如表1所示。从中可以看出,FRP材料的主要优点有:

(1)轻质高强。FRP的比强度一般是钢材的20~50倍,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,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,使得结构的维护费用和周期都将大大降低。

(3)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。

(4)FRP产品非常适合于在工厂生产、现场安装的工业化施工过程,有利于保证工程质量,有利于工程建设的工业化。

(5)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。

常用FRP材料与结构钢材力学性能比较 **表1**

序号	材料	纤维体积含量	容重 γ (kN/m)	拉伸强度 σ (MPa)	弹性模量 E (GPa)	比强度 ($\times 10^4$)	比刚度 ($\times 10^4$)
1	A3钢		78.5	410	210	0.5	2.7
2	高强钢丝		78.5	1600	200	2	2.5
3	碳纤维HT/环氧	0.6	15.5	1620	140	10.5	9
4	碳纤维HM/环氧	0.6	16.7	600	290	3.6	17.4
5	硼纤维/环氧	0.6	21	1400	215	6.7	10.2
6	Kavler/环氧	0.6	13.8	1348	76	10	5.5
7	玻璃纤维/环氧	0.6	20	780	40	3.9	2

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。

(2)与钢材相比较,大部分FRP产品的弹性模量较低,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问题。在FRP结构中,连接部位通常都是整个构件的薄弱环节。

(4)FRP材料强度的离散性较大。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。

2 FRP材料在大跨斜拉桥中的运用

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,近年来在日本获得了很大的发展,在多座斜拉桥中的实际应用中证实了其可行性和优越性。与此同时,由于复合材料可向结构提供高的比强度、比刚度,加之其耐疲劳、耐腐蚀、在悬殊温度下的热胀系数较低(比钢材低得多),用于斜拉桥,可使其有效承载能力与极限跨越能力长足进步,为斜拉桥突破上千米的跨径提供更有力的保证。因此在大跨、特大跨斜拉桥中有着诱人的应用前景。

从主缆的静力角度出发,经推导可以得到用FRP材料做主缆的斜拉桥与钢主缆斜拉桥的极限跨径的关系为

$$l_c = \sqrt{\frac{\sigma_c \gamma_g}{\sigma_g \gamma_c}} l_g$$

其中,γ_c,γ_g,l_c,l_g,σ_c,σ_g分别为复合材料斜缆与钢主缆的容重、极限跨径与极限强度。

若用表1中序号3~7的5类复合材料制作斜缆,其极限跨径可达钢主缆斜拉桥的2.3、1.3、1.8、2.2、1.4倍,根据国外文献对钢索斜拉桥极限路径的分析,表1中的5类复合材料拉索斜拉桥可能达到的极限跨径如表2所示。

维普资讯 http://www.cqvip.com

钢索、复合材料斜拉索斜拉桥极限跨径比较 表2

	高强钢丝	碳纤维HT/环氧	碳纤维HM/环氧	硼纤维/环氧	Kavler/环氧	玻璃纤维/环氧
按照斜缆承载能力要求	3000～4800	6900～11000	3900～6200	5400～8600	6600～10560	4200～6720
按照斜缆刚度要求	1300	2900	1690	2340	2860	1560
按照斜缆动力要求计算	600～1200	1380～2760	780～1560	1080～2160	1320～2640	840～1680

考虑到复合材料拉索的实际垂度比钢索小，动力性能，尤其是抗疲劳性能远优于钢索（例如，19根单丝的CFRP缆索，在2×10^6次循环荷载下未发生破坏，其疲劳强度约为相同条件下钢索的4倍），因此，碳纤维、硼纤维等高级复合材料拉索斜拉桥达到8 400m以上的跨径是有可能的。这也表明，在直布罗陀海峡最窄处建造主跨8 400m的CFRP斜拉桥的建议方案是可行的。此外，大跨斜拉桥的发展，不仅使拉索进化为主要提供弯、扭刚度的密索体系，还使主梁退化为主要提供轴向刚度的简单结构。因此，在促证轴向刚度相等的前提下，采用复合材料主梁，还可使上部结构恒载进一步降低，承受活载的比重进一步增大，并使斜缆构造、锚固张拉及索塔、基础的结构构造处理也大大简化。

3 FRP材料在大跨悬索桥中的运用

在大跨悬索桥中，若假定主缆形状为抛物线形状，则主缆的张力T与应力σ_a的关系可以表达为

$$\lambda\leqslant\frac{8n\sigma_aA}{(w_c+w_s)\sqrt{1+16n^2}}=\frac{8n\sigma_a}{\gamma(1+w_s/w_c)\sqrt{1+16n^2}}$$

其中，λ、f、w_c、w_s、n、A分别为结构主跨、矢高、主缆恒载集度、恒活载总集度，矢跨比，主缆的截面面积。再将$\omega_c=A\gamma_c$带入，则可以得到结构的极限跨径

$$T=\frac{(w_c+w_s)\lambda^2}{8f}\sqrt{1+16\left(\frac{f}{\lambda}\right)^2}=\frac{(w_c+w_s)\lambda}{8n}\sqrt{1+16n^2}\qquad T/A\leqslant\sigma_c$$

由此可以画出主跨与矢跨比、总荷载集度/主缆恒载集度的关系如图1所示。

从图表中可以看出，对于主跨5 000m的悬索桥，为了使得结构方案在现有的施工方法下确实可行，主塔高度必须限制在300m以内，即必须采用1/20的矢跨比。这样若采用钢主缆，恒、活载总集度与主缆恒载的比值为1.0左右，这就是说，结构只能承担主缆

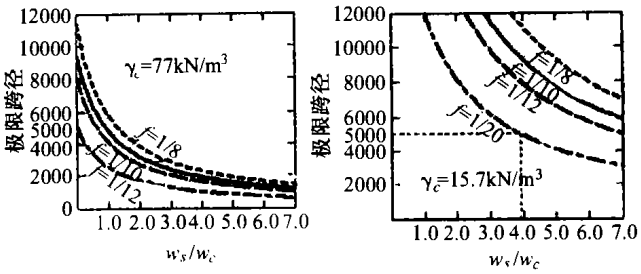


图1 悬索桥主跨与矢跨比的关系

的恒载重量。而采用FRP材料作为主缆，恒、活载总集度与主缆恒载的比值可以在4.0左右，若桥面系统采用钢做材料，恒、活载总集度与主缆恒载的比值将大大超出此值，这就要求主梁、主缆均必须采用轻质、高强的CFRP材料。

基于以上分析，日本学者提出了一个主跨为5 000m的悬索桥方案，主梁与主缆均采用了CFRP，分跨为1 980m + 5 000m + 1 980m，采用三跨简支的形式。结构总体布置图与主梁、主塔的断面分别如图2、图3所示，主梁的断面形式的选取主要考虑结构的空气动力稳定性能，所以采用了完全流线形的外形，同时保证主梁有较大的抗扭刚度，桥面系统采用了GFRP，主塔采用了CFRP与混凝土的混合材料。

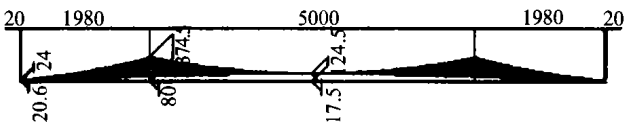


图2 结构总体图

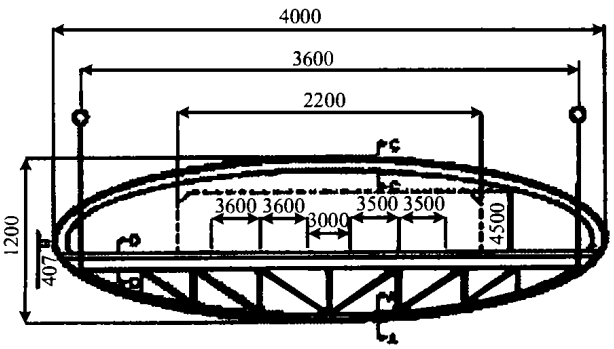


图3 主梁断面图

同时日本学者对该方案进行了静力分析，在分析中着重对主梁的形式进行了对比，从计算结果发现，主梁采用连续形式会使得主梁塔根处的弯距显著增大，而对提高结构刚度的帮助不大。

在对结构进行风洞实验时发现，若不采取任何措施来提高结构的抗风稳定性，其颤振临界风速只有37.7m/s，为了提高结构的空气动力稳定性能，可以采用两种措施，如图4、图5所示，同时研究了主梁抗扭刚度提高对于临界风速的影响。风洞研究结果如

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 3 所示。

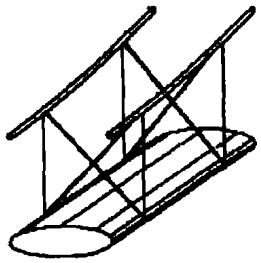


图 4 交叉连杆
(模型 ST-1)

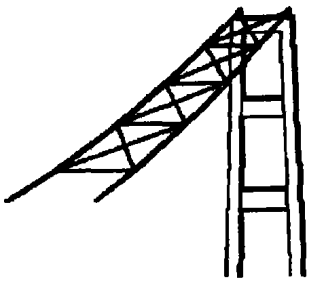


图 5 平面缆索体系
(模型 ST-2)

若在 ST-2 的模型中采取一些增加结构阻尼的措施,结构的临界风速可以很容易达到 70m/s 以上。研究结果同时还表明,单靠采取增加主梁的板厚、提高主梁的抗扭惯矩对提高结构的极限风速效果并不明显。

结构临界风速 表 3

	基本模型	ST-1 模型	ST-2 模型
临界风速	37.7	53.3	59.1
面内振性	0.0511	0.0512	0.0512
扭转振性	0.1784	0.1822	0.1954

4 结论

FRP 材料作为一种自重轻，强度高，刚度大的新型材料，加之其耐疲劳，耐腐蚀，低热膨胀系数，在大跨、特大跨桥梁中有着诱人的应用前景。可使其有效承载能力与极限跨越能力长足进步，为修建超大跨径的海峡大桥提供更有力的保证。但对于 FRP 材料还有一些需要做进一步的研究，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。但无论如何，FRP 材料的显著优异品质，将使其在桥梁工程中发挥出传统结构材料难以替代的作用，在新世纪中将得到更加广泛的应用。

参考文献：

[1] Tetsuo HOJO, Tadayuki NORO. Application of Carbon-fiber Cables for Cable-supported Structures [R] . IABSE Symposium Melbourne 2002.

[2] Gert KÖNIG, Reinhard MAURER. Composite and Hybrid Structural SystemsPotential by Using High Performance Material [R] . IABSE Symposium Melbourne 2002.

[3] Ken-ichi MAEDA, Torahiko IKEDA, Hitoshi NAKAMURA. Feasibility of Ultra Long-Span Suspension Bridges Made of All Plastic [R] . IABSE Symposium Melbourne 2002.

(上接第 58 页)

$$l = 2\sum_{i=1}^{k}\Delta l_i \qquad (17b)$$

其中，Δl_1 到 Δl_{k-1} 为梁上剪力 Q_1 到 Q_{k-1} 对应的长度，Δl_k 是为了满足式 (17a) 剪力 Q_k 对应的长度的一部分。则理论上所粘贴 CFRPs 的最短长度为

$$l_{min} = 2\sum_{i=1}^{k}\Delta l_i \qquad (18)$$

3 建议

在用 CFRP 布加固梁、提高梁抗弯承载力的设计中，必须验算粘贴层的剪切应力是否满足剪切强度要求，即 CFRP 布与混凝土之间的剪切应力必须小于粘贴胶层和混凝土的剪切强度。

参考文献：

[1] 叶列平，赵树红，等．碳纤维布加固混凝土柱的斜截面受剪承载力计算 [J] ．建筑结构学报，2000，21 (2)：59－66.

[2] 胡孔国，岳清瑞，等．考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算方法[J] ．冶金工业部建筑研究总院院刊，2000 (1)：55－58.

[3] 邓宗才．碳纤维布增强钢筋混凝土梁抗弯力学性能研究 [J] ．中国公路学报，2001，14 (2)：45－51.

[4] Marco Arduini, Antonio Nanni. Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement [J] . ACI Structural Journal, 1997, 94 (5)：493－500.

[5] Marco Arduini, Angelo Di Tommaso. Antonio Nanni Antonio Nanni. Brittle Failure in FRP Plate sheet bonded Beams [J] . ACI Structural Journal, 1997, 94 (4)：363－370.

[6] Allen Ross C, David M Jerome, Joseph W Tedesco, Mary L Mughes. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite laminates [J] . ACI Structural Journal, 1999, 96 (2)：212－220.

[7] 李松辉，王松根，刘立刚．CFRP 加固钢筋混凝土梁正截面强度计算方法研究 [J] ．公路交通科技，2002，19 (6)：88－91.

[8] 叶见曙．结构设计原理 [M] ．北京：人民交通出版社，1997.

[9] 赵彤，谢剑，戴自强．碳纤维布加固钢筋混凝土梁的受弯承载力试验研究 [J] ．建筑结构，2000，30 (7)：11－15.