

文章编号:1671-8879(2007)06-0048-05

碳纤维复合材料索斜拉桥的设计与测试

梅葵花^{1,2}, 吕志涛², 张继文², 刘 钊²

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为了解碳纤维复合材料(CFRP)索斜拉桥的结构性能、施工技术以及长期性能,进行了中国首座 CFRP 索斜拉桥的设计和应用研究。阐述了该桥主要部件的设计要点,采用有限元法分析了其整体受力性能;结合该桥的建造,研究了中等长度 CFRP 拉索的制备工艺和安装工艺;根据施工过程仿真分析结果,提出拉索的张拉方案,并在拉索张拉期间,对主梁、主塔及拉索进行了全面的测试。测试结果表明,测试值与理论值吻合良好,CFRP 拉索中各根筋材受力均匀性很好。该桥在建造期间的测试、分析以及经过 2 年多的使用充分表明,CFRP 拉索在中国斜拉桥上的初次应用是成功的。

关键词: 桥梁工程;斜拉桥;CFRP 拉索;设计研究;制索工艺;测试

中图分类号: U448. 27

文献标志码: A

Study on the design and test of the cable-stayed bridge with CFRP cables

MEI Kui-hua^{1,2}, LÜ Zhi-tao², ZHANG Ji-wen², LIU Zhao²

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to find out the structural performance, construction techniques and long term behavior of the cable-stayed bridge with CFRP cables, the study on the design and application of the first cable-stayed bridge with CFRP cables in China is carried out. In the study of design, the design essentials of the main components of the bridge are elaborated and its integral performances are analyzed by finite element method. Combined with the construction of the bridge, the facture and fixing technics of CFRP cables are studied. Based on the results of simulation of construction, a tension scheme for the bridge is propound. During drawing, the beam, the towers and the cables are all tested. The results indicate that the test values are accord well with the calculated values and that the tensions in the CFRP tendons be uniform. Through the test and analysis during the construction of the bridge and the service about two years, it indicates that the first usage of CFRP cables in the cable-stayed bridge in China is successful. 2 tabs, 8 figs, 9 refs.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; CFRP cable; design study; fabrication technology of cables; test

收稿日期:2006-12-01

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50238030);国家自然科学基金项目(50178018)

作者简介:梅葵花(1974-),女,湖北黄梅人,长安大学讲师,东南大学博士,E-mail:meikuihua@sohu.com。

0 ~~인~~ 言

斜拉桥的拉索由于其特殊的使用条件而极易产生腐蚀退化和振动疲劳问题。碳纤维复合材料(CFRP)拉索具有耐腐蚀、抗疲劳的性能优点,采用CFRP拉索将是解决这一问题的根本途径。此外,随着斜拉桥向特大跨和超大跨的方向发展,传统钢拉索由于自重较大,导致拉索的等效弹性模量下降很快,拉索的架设难度也越来越大,以致在超大跨斜拉桥中不能胜任。采用轻质、高强的CFRP拉索,可减轻拉索自重,提高桥梁跨越能力以及减小下部结构尺寸,从而对降低综合经济指标及施工技术难度具有十分重要的意义^[1-2]。早在1987年,就有资深专家提出在直布罗陀海峡最窄处建造8 400 m的全CFRP斜拉桥的伟大构想和理论可行性^[3];此后,瑞士、日本、丹麦、美国等国家都竞相开展CFRP斜拉桥的研究,现已建成两座全CFRP拉索的人行桥和

两座部分采用 CFRP 拉索的公路桥^[4-5],但相应的报道均不具体完整。为推动 CFRP 索斜拉桥在中国的发展并积累经验,更好地了解该类型桥梁的结构性能、施工技术以及长期性能,东南大学土木工程学院主持了中国首座 CFRP 拉索试验桥的设计和应用研究,江苏大学和北京特希达科技有限公司合作参与。限于篇幅,本文仅对该桥的设计、制索工艺及挂索期间的测试进行了分析研究。

1 桥梁概况

该桥位于江苏大学校本部西山区,为独塔双索面斜拉桥,采用塔梁墩固结体系,跨径布置为 30 m + 18.4 m。斜拉索采用 CFRP,主梁和索塔为钢筋混凝土结构。桥梁总宽为 6.8 m,人行道宽为 5.0 m,主塔两侧各布置 4 对 CFRP 拉索,桥台支承在扩大基础上,主塔及桥墩支承在挖孔桩基上,总体布置如图 1 所示。

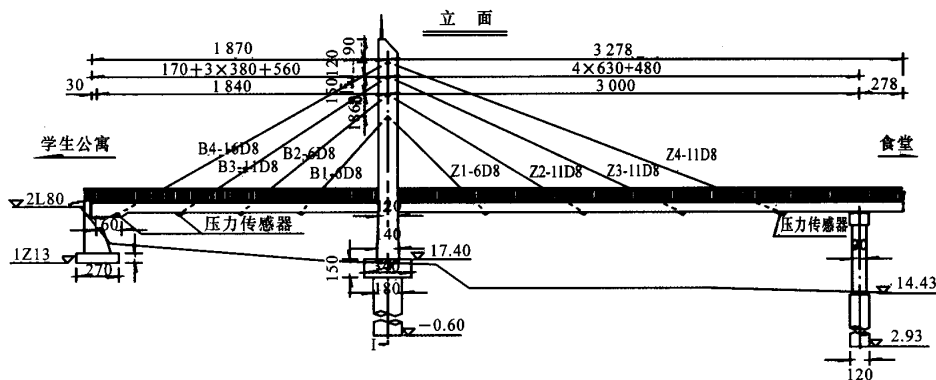


图 1 江苏大学 CFRP 索斜拉桥总体布置

注:图中单位除高度以 m 计外,其他均以 cm 计;B4-16D8, Z1-6D8……为拉索编号。

该桥于 2004 年 2~5 月进行设计,6 月动工建造,2004 年 8~11 月进行了 CFRP 拉索锚具的研制和试验,2005 年 3 月中旬完成实桥的制索,于 2005 年 4 月 16 日顺利实现了拉索的挂索和张拉。2005 年 5 月底,中国首座 CFRP 索斜拉桥顺利建成。

2 设计研究

2.1 结构部件的设计

2.1.1 CFRP 拉索设计

该桥 CFRP 拉索采用日本三菱公司生产的直径为 8 mm 的 Leadline 筋,其保证强度为 2 300 MPa,为安全起见,允许应力取 0.35 倍的保证强度。根据全桥受力要求,共采用 3 种类型的斜拉索,标记为 16-D8、11-D8、6-D8,各类型拉索在桥上的布置如图 1 所示。CFRP 拉索所用锚具为粘结型锚具,并

采用了树脂和高性能微膨胀水泥两种灌注材料,自由段各根筋材的间隙与其在锚具内间隙相同,通过设置间距 1.5 m 左右的分丝板来保持筋材的平行性。筋材外设 PE 护套防护,由于 CFRP 耐腐蚀,PE 护套内无需再灌注任何填充物。对 3 种类型拉索,分别进行了两种灌注料的锚具试验研究,所有锚具均以筋材破断的方式失效,锚具的效率系数均大于 93%^[6]。

2.1.2 主梁设计

本桥主梁采用双边肋梁,梁高 1.0 m,双肋共宽 1.4 m,桥面板厚 0.14 m。每对斜拉索与主梁相交处均设横梁,其厚度为 0.22 m。梁上的套管管位于边肋中心处,通过梁下外露的齿板锚固拉索。鉴于第一次采用 CFRP 拉索,为安全起见,主梁抗弯和抗剪配筋较为富余。

2.1.3 主塔设计

本桥主塔采用便于施工的直立双柱式塔,顺桥向塔宽 1.2~1.4 m,横桥向单柱宽 0.7 m,桥面以上塔高 13.3 m。采用了实心截面塔柱,两侧拉索交叉地穿过预埋索导管,锚固在塔壁实体的齿板上。为美观起见,拉索张拉就位后,再在横桥向塔壁上安装外罩钢板。

2.2 整体受力分析

采用平面及空间有限元程序分析该桥的整体受力特性,包括对合理成桥状态、施工状态及运营状态的静力分析,以及对结构的动力特性、地震反应的分析 and 安全性评估。

2.2.1 合理成桥状态的确定

斜拉桥设计计算时,首先需要确定合理成桥受力状态,当结构布置确定后,调整成桥恒载受力状态的手段为调整恒载(压重)分布和调整索力。本桥边、中跨跨径之比为 0.61,通过在边跨主梁端部设置 5.5 m 长的实体段来消除边、中跨的不平衡力和边支座负反力。经索力优化后,本桥由边跨最外索至主跨最外索的 8 对索的成桥索力为 1 100 kN、587 kN、349 kN、353 kN、349 kN、548 kN、680 kN、725 kN,并据此选用了 3 种类型 CFRP 拉索,最大的索由 16 根 Leadline 筋组成。

2.2.2 结构静力分析

使用阶段计算的主要荷载组合有:组合Ⅰ,结构重力+人群+混凝土收缩徐变+基础变位;组合Ⅱ,结构重力+人群+混凝土收缩徐变+基础变位+结构整体降温 20℃+风力;组合Ⅲ,结构重力+人群+混凝土收缩徐变+日照温差+风力。计算表明:主梁受力在组合Ⅱ下最不利,主跨主梁跨中部位最大弯矩为 2 280 kN·m;主塔受力在组合Ⅲ下最不利,主塔根部最大弯矩为-3 370 kN·m;所有截面均满足极限承载能力和正常使用要求。

2.2.3 结构动力特性分析

动力特性分析采用了两种模型:①三主梁模型;②用壳元和梁元模拟主梁的复杂模型。动力特性分析表明,该桥前几阶的空间振动形态比较单纯,各阶自振频率差值较大,由于塔梁交接处采用固结方式,使得该桥两跨之间的扭转耦合在塔梁固结处被大大削弱,因而振型中出现明显的单跨扭转振型。表 1 给出了前 10 阶振型及相应的频率。

2.2.4 地震响应分析

据该桥《岩土工程勘测报告》提供的地质资料信息,该桥场地土类型为Ⅲ类,桥所在镇江地区的设防

表 1 江苏大学 CFRP 索斜拉桥动力特性

序号	频率/Hz		振型特点
	复杂模型	三主梁模型	
1	2.490	2.502	主梁 1 阶对称竖弯
2	2.923	2.899	主塔侧弯
3	4.282	5.503	主跨主梁 1 阶扭转
4	4.420	4.255	主梁 1 阶对称竖弯+主塔纵弯
5	6.197	6.212	边跨主梁 1 阶竖弯
6	7.495	6.631	主跨主梁 1 阶反对称竖弯
7	7.792	7.682	主梁 1 阶扭转+两塔柱反向纵弯
8	8.437	8.095	主跨主梁 1 阶反对称竖弯
9	8.712	7.963	主梁侧弯+主塔侧弯+主梁扭转
10	10.575	11.244	主跨主梁 2 阶扭转

烈度为Ⅶ度,设计地震加速度为 0.15g。根据《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89),对本桥地震反应采用反应谱方法计算^[7-8],并取结构重要性系数为 1.0,水平地震系数为 0.15,综合影响系数为 0.35。取两种地震反应组合:①顺桥向(x 向)地震输入+0.5 竖向(z 向)分量;②横桥向(y 向)地震输入+0.5 竖向(z 向)分量。振型取前 20 阶并按平方和开方法组合。最后得到的结构各主要部位的地震反应(表 2)。经检算,地震反应值均小于结构静力控制值。

表 2 结构主要部位的地震反应

工况	截面位置	$M_x/$ (kN·m)	$M_y/$ (kN·m)	$M_z/$ (kN·m)	$F_x/$ kN	$F_z/$ kN
工况 1	单塔柱根部	48.2	663.5	1.2	72.7	212.0
	主跨主梁跨中	0	451.4	0	125.3	32.6
	主梁塔梁交接处	0	550.0	0	203.9	70.3
工况 2	单塔柱根部	7.4	116.8	192.6	138.9	36.4
	主跨主梁跨中	7.4	103.4	974.9	47.5	17.5
	主梁塔梁交接处	0.3	95.4	1 117.7	14.8	6.2

注: M_x 、 M_y 、 M_z 分别为 x、y、z 方向的力矩; F_x 、 F_z 分别为 x、z 方向的力。

3 CFRP 拉索的制作和安装工艺

CFRP 拉索的制作和安装工艺在国内外均未见有可供参考的研究报道,因此也是本文的研究内容之一。

3.1 CFRP 拉索制作工艺

该桥 CFRP 拉索由课题组部分成员在现场制作,通过探索和积累经验,形成了如下制作工艺:下料→集束并调直→穿防护套→穿锚→灌锚→养护。每道制作工序都非常关键,制作的优劣将影响 CFRP 拉索的使用性能,制作成品如图 2 所示。

制作要点:①保证锚口间自由段的筋材长度一



图2 制作完成后的CFRP拉索系列

致,且没有扭绞,可通过在自由段设置数个定位板的措施来保证;②保证灌注的密实性。

3.2 CFRP 拉索安装工艺

CFRP 筋轴向抗拉强度很高,但其抗弯折的能力却较差,因此 CFRP 拉索的安装工艺不能采用传统钢拉索的安装工艺。

该桥挂索采用的主要工艺流程为:先用手动葫芦竖向提升拉索张拉端,然后斜向上牵引至塔上索导管入口,接着将系有钢丝绳的张拉杆从塔上索导管出口处放下,并与有内螺纹的张拉端锚具连接在一起,再用手动葫芦拉出,随后从梁上索导管口放下固定端锚具,最后调整两锚具在锚口以外的长度,准备张拉。挂索过程中,通过检查两锚具末端所作标记始终朝上来保证拉索没有扭转^[9],如图3所示。



图3 CFRP 拉索的安装

4 测试分析

4.1 张拉方案

该桥所有拉索分5级,一次性张拉到位,不再二次调索,这就需要精确模拟施工过程。但该桥主梁采用满堂支架施工,为证实一次性张拉方案的可行性,对支承刚度的误差进行了影响量分析。分析表明,施工过程受支架支承刚度的影响较小。这是由于其主梁的刚度相对较大,张拉期间梁在不同支承刚度下的变位较小,从而对索力的影响较小。因此,拉索一次性张拉到位是可行的。

该桥 CFRP 拉索张拉顺序为由内至外,张拉靠近塔柱的两对索定为施工阶段1,其余索依次类推,而张拉完后拆除梁下支架定为施工阶段5。

4.2 测试内容及方法

在拉索张拉期间和拆除支架前后,对包括主梁、

主塔和拉索的主要部件,进行了全面的测试。对主梁测试了应力和变位,应力采用预埋的混凝土应力计测试,变位采用百分表测试;对主塔也测试了应力和塔顶变位,应力采用千分表测试,变位采用经纬仪测试;对拉索测试了张拉力和应力,张拉力主要以精密油压表的读数为准,其中 B4R、B3L、Z4L 3 根拉索固定端锚下安设了永久性的压力传感器,主要用于长期监测索力,在部分筋材上粘贴了应变片用于测试筋材受力的均匀性。测试断面如图4所示。

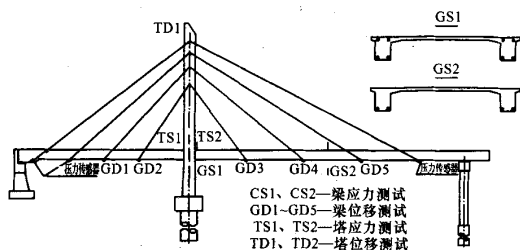


图4 测试断面布置

4.3 测试结果及分析

拉索张拉至每级荷载时均进行了全部测试,但限于篇幅,除拉索应力列出了每级张拉力下的测试值外,其余测试内容仅列出每对拉索5级张拉的累计测试值。主梁和索塔的测试结果及与理论计算值的比较见图5~图7,限于篇幅,仅列出部分拉索的应力测试结果,如图8所示。

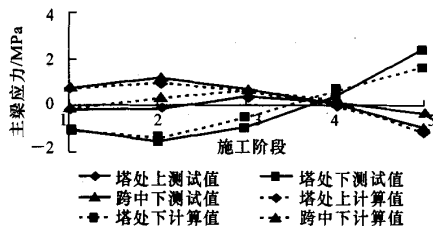
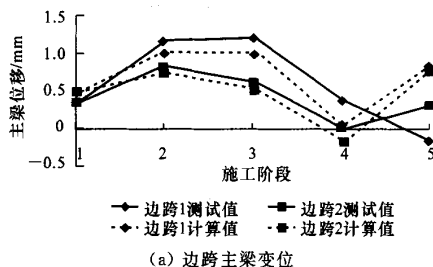
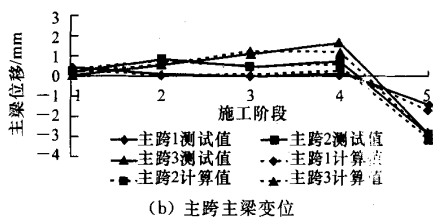


图5 主梁应力测试值与计算值的比较



(a) 边跨主梁变位



(b) 主跨主梁变位

图6 主梁位移测试值与计算值的比较

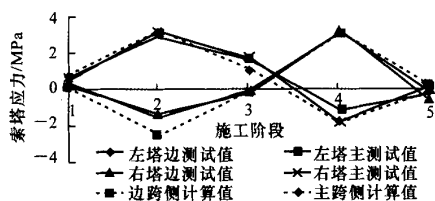


图7 索塔应力测试值与计算值的比较

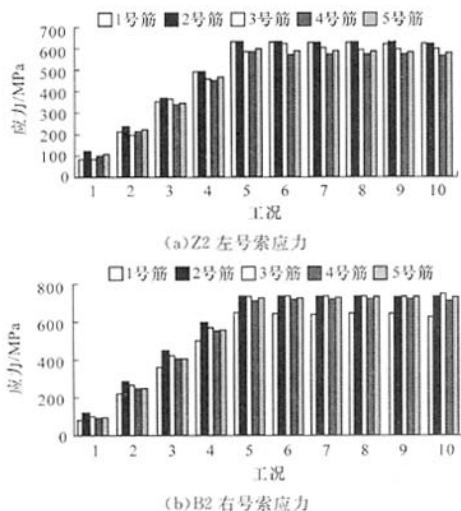


图8 拉索应力测试值

注:横轴的编号1~5分别对应5级张拉,6~10分别对应持荷时间为0.5、1、1.5、2、2.5、3 h

由图8可见,除边跨主梁某些测点的变位测试值在拆除支架工况时与计算值相差较大外,其余测试值与计算值吻合良好;各根筋材受力均匀性很好,且持荷一定时间时,测试的应力没有明显下降,说明在使用荷载下,树脂的蠕变变形不明显。

5 结 语

(1)对CFRP索试验桥的静力分析表明,该桥在最不利荷载组合下,所有截面均满足极限承载能力和正常使用要求。

(2)该桥的动力特性分析表明,其前几阶的空间振动形态比较单纯,由于塔梁交接处采用固结方式,振型中出现明显的单跨扭转振型。

(3)由于CFRP拉索的抗剪和抗弯性能不同于钢拉索,CFRP拉索的制作和安装工艺非常关键。

(4)拉索张拉期间的测试结果表明,主梁、索塔的应力和位移测试值与理论计算值吻合良好,CFRP拉索中各根筋材受力均匀性很好。

(5)该桥的设计研究和建造,为今后采用CFRP建造超大跨海峡大桥等工程作出了成功的探索和实践,积累了经验。

参考文献:

References:

- [1] 梅葵花,吕志涛. CFRP斜拉索的静力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 43-45.
MEI Kui-hua, LÜ Zhi-tao. Static characteristic analysis of CFRP cables [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 43-45.
- [2] 梅葵花,吕志涛,孙胜江. CFRP拉索的非线性参数振动特性[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 52-57.
MEI Kui-hua, LÜ Zhi-tao, SUN Sheng-jiang. Property of nonlinear parametric vibration of CFRP cables [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 52-57.
- [3] 李正仁. 关于在直布罗陀海峡最窄处建造碳纤维增强复合材料的建议[J]. 国外桥梁, 1990, (4): 45-50.
LI Zheng-ren. Suggestion of constructing CFRP bridge at the narrowest point of Gibraltar Strait [J]. Overseas Bridge, 1990, (4): 45-50.
- [4] Nik W, Pascal K. Carbon fiber products (CFP): a construction material for the next century [C]// Amsterdam A A. Proceedings of the 13th FIP Congress. Balkema: Balkema Publishers, 1998: 69-72.
- [5] Francesco L S, Vistasp M, Karbhari F S. The I-5/Gilman advanced technology bridge project [C]// Liu S C. Proceedings of SPIE. USA: Newport Beach, CA, 2000: 10-17.
- [6] 梅葵花. CFRP拉索斜拉桥的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [7] 李忠献,黄健,丁阳,等. 不同地震激励下大跨度斜度桥的地震反应分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 48-53.
LI Zhong-xian, HUANG Jian, DING Yang, et al. Seismic responses of long-span cable-stayed bridges under different patterns of earthquake excitations [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 48-53.
- [8] 谭冬莲,肖汝诚. 基于Levenberg-Marquardt算法的桥梁结构静力参数识别[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 56-59.
TAN Dong-lian, XIAO Ru-cheng. Static parameter identification of bridge structure based on Levenberg-Marquardt algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 56-59.
- [9] 谢天刚,刘晓辉,万龙. 钢绞线索夹片锚具张拉要点及常见问题[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(7): 37-40.
XIE Tian-gang, LIU Xiao-hui, WAN Long. Points and common problems on steel cable strand tapered anchorage stretch [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(7): 37-40.