文章编号:1007-4708(2009)05-0751-06

碳纤维复合材料拉索的非线性力学性能

张建东*[1], 方 志[2]

(1.广东省建筑设计研究院,广州 510010;2.湖南大学 土木工程学院,长沙 410082)

摘 要:采用解析法分析碳纤维复合材料(CFRP)拉索的非线性力学性能,通过与钢拉索对比分析,得出了CFRP拉索的受力特点。由于密度低,CFRP拉索自重应力、垂度约为钢拉索的1/5,承载效率也比钢拉索高许多,其承载极限长度为钢拉索的7倍,且随跨径增大,钢拉索的等效弹性模量下降非常快,而CFRP索仍保持较高值。由于CFRP线胀系数比钢材的线胀系数要小得多,约为其1/14,在温差与约束相同时,无垂度CFRP索温度应力仅为无垂度钢索的1/23。当有垂度时,钢索的温度应力降低,CFRP索的温度应力变化很小。

关键词:CFRP拉索;极限跨径;垂度效应;温度应力

中图分类号:U448.27 **文献标识码**:A

1 引 言

现代缆索支承桥梁的拉索几乎均采用高强钢丝或钢绞线,但由于钢材本身所固有的本质特征,使得这类钢制拉索存在着腐蚀退化和振动疲劳问题。由于钢材的耐腐蚀性能较差,钢制吊杆的使用年限一般仅为20年左右,远低于桥梁结构体系本身的使用寿命(可长达百年),钢制拉索与混凝土构件的耐久性不协调。且由于钢拉索自重大,随跨径的增大,导致其等效弹性模量、承载效率显著降低,以致在超大跨径的桥梁中不能胜任。目前虽已采用了多种技术来克服这些弱点,但由于钢材的本质特征,这些问题并未得到很好地解决,迫切需要一种新型材料来替代。

2 CFRP材料的特性

碳纤维复合材料CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)具有抗拉强度高、自重小、耐腐蚀、低松弛及抗疲劳性能好等特性,可用于替代钢制拉索[1-4]。目前采用CFRP拉索的桥梁有日本某全FRP结构的试验桥、瑞士Stork bridge(单塔斜拉桥)、丹麦Herning人行斜拉桥和我国江苏大学西山人行天桥,CFRP拉索在中等跨径斜拉桥中应用的设计和施工方面的问题也已得到基本解决[5]。

CFRP存在一些不足,主要表现为:材料整体的抗剪强度及层间剪切强度低,因而造成连接件设计上的困难;另外,CFRP材料直到拉断表现为线弹性的力学特征如图1所示,断裂应变小,破坏呈脆性以及防火性能差等,这些也是其应用到实际工程中不可忽视的问题。此外,现阶段CFRP拉索的较高造价亦是妨碍其广泛应用的主要因素。

两种材料主要力学性能比较列入表1。CFRP材料的密度约为高强钢丝的1/5,比强度约是高强钢丝的7倍,比刚度约为高强钢丝的5倍,温度线膨胀系数约为高强钢丝的1/14。

表1 CFRP与高强钢丝的材料性能比较[3]

Tab.1 The material property of CFRP and steel

材料	高强钢丝	CFRP
密度(kg/m^3)	8012	1579
弹性模量(GPa)	195	147
抗拉强度(MPa)	1860	2550
极限应变(%)	>4.0	1.0~2.0
线膨胀系数(10^{-6}/℃)	12	0.7

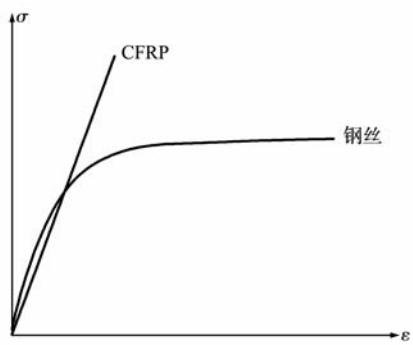

图1 CFRP与钢丝的应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain relationship of CFRP and steel

收稿日期:2007-06-28;**修改稿收到日期**:2008-10-08.

作者简介:张建东*(1976-),男,高级工程师,工学硕士(E-mail:zjdhezb@126.com);
方 志(1963-),男,博士,博士生导师.

3 几何非线性

3.1 垂度效应

随着桥梁向大跨径方向发展，结构的非线性效应也越来越受重视。索构件的非线性效应主要是由自重引起的垂度效应，如图 2 所示。索形基本方程可表述为悬链线[6]：

$$y = \frac{H}{q}\left[\mathrm{ch}\alpha - \mathrm{ch}\left(\frac{2\beta}{L}x - \alpha\right)\right] \tag{1}$$

式中 $\alpha = \mathrm{arcsh}\dfrac{-\beta(h/L)}{\mathrm{sh}\beta} + \beta, \beta = \dfrac{qL}{2H}$

实际工程中拉索的垂度较小，其自重荷载可近似为弦向均布，则拉索的线形可近似为二次抛物线。对于弦长为 L_c，索容重为 γ，倾角为 θ 的拉索，当应力为 σ，可推导得垂直于弦的垂度为

$$k_c = \frac{\gamma L_c^2}{8\sigma}\cos\theta \tag{2}$$

由式(2) 可以看出垂度与弦长的平方成正比，与拉索材料容重成正比，与索中应力成反比。为了减小不利的垂度，要采用强度与容重比大的材料。CFRP 拉索的出现，满足了这种要求。当相同的拉索长度、倾角及应力时，CFRP 拉索垂度仅为钢拉索的 1/5。当相同的拉索长度、倾角及垂度时，CFRP 斜拉索的拉应力只有钢拉索的 20%，即 CFRP 拉索的有效承载力可提高 80%。在缆索支承桥梁中，拉索自重占上部结构自重很大的一部分，有的达到 70%[7]，如用 CFRP 拉索来替代，则可使其承受活载的比例由常规材料的 10% ～ 20% 提高到 60% ～ 65%，这是特大跨度斜拉桥要使用 CFRP 材料的一个重要原因。

带有垂度的拉索与拱结构类似，也存在垂跨比。垂跨比是垂索的一个特征数，影响索内力的分布。拉索的垂跨比公式

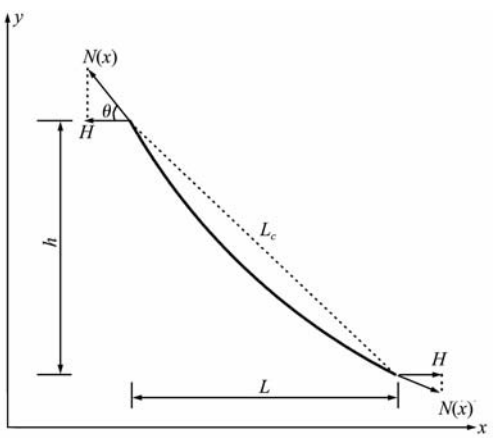

图 2 索的形状

Fig. 2 Configuration of cable

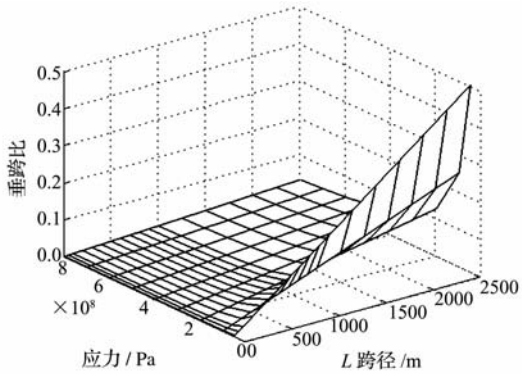

图 3 钢拉索垂跨比变化曲面

Fig. 3 The relationship of sag-span ratio to stress and span for steel cable

$$\frac{k_c}{L_c} = \frac{\gamma L}{8\sigma} \tag{3}$$

式中 $L = L_c\cos\theta$ 为索水平投影长度。

钢和 CFRP 拉索的垂跨比随跨径与索应力的变化的曲面如图 3 和图 4 所示。式(3) 及图 3 和图 4 中数据显示，当跨径与索应力相同时，CFRP 索的垂跨比仅为钢拉索 1/5。钢和 CFRP 拉索的垂跨比皆随跨径增大而增大，随应力的增大而减小，当应力与跨径比大于 1.6×10^5 N/m^3 时垂跨比很小。

3.2 等效弹性模量

分析拉索结构时为简化计算，通常采用等效弹性模量来考虑拉索的垂度效应。等效弹性模量法目前采用最广的是 1965 年由德国学者 Ernst 提出的 Ernst 公式。Ernst 等效弹性模量公式为

$$E_{eq} = \frac{E_0}{1 + \left[\dfrac{(\gamma L)^2}{12\sigma^3}\right]E_0} \tag{4}$$

式中 E_0 为索材料的弹性模量。

从式(4) 可以看出，等效弹性模量随拉索容重、跨径的增大而减小，随索中应力的增大而增大。图 5 为钢拉索和 CFRP 拉索在应力为 200、400 及 600 MPa 时等效弹性模量随跨径的变化。可见，在拉索长度与索中应力相同的情况下，CFRP 索的等效模量的折减比钢索低得多。当索内应力为 200 MPa，跨径大于 160 m 时，CFRP 索的等效弹性模量已超过钢索。当 CFRP 索应力大于 400 MPa，弹性模量随跨径增大折减较慢，且跨径小于 1500m 时弹性模量下降小于 10%。

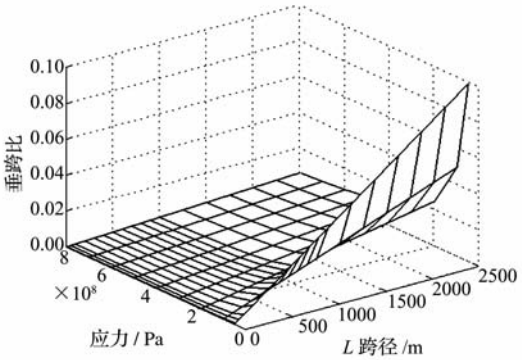

图 4　CFRP 索垂跨比变化曲面

Fig. 4　The relationship of sag-span ratio to stress and span for carbon cable

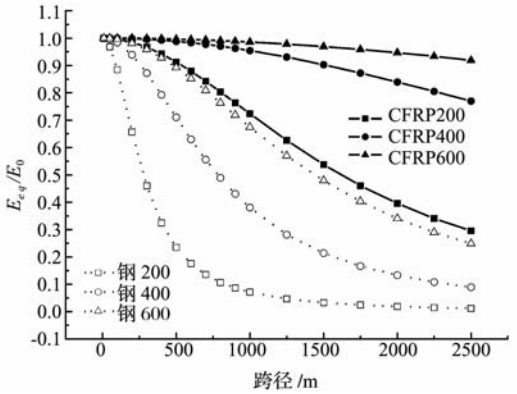

图 5　弹性模量折减率

Fig. 5　Reduction coefficient of elastic modulus

4　荷载作用

4.1　重力作用

在大跨度桥梁中拉索的自重占有很高的比重，拉索的自重应力分析具有重要意义。拉索一般承受轴向荷载，因此分析自重应力时主要分析自重荷载对拉索的轴向正应力。

当拉索垂直时如吊杆，可推导下列自重应力式为

$$\sigma = \frac{G}{A} = \int_0^y \frac{q}{A}\mathrm{d}y = \int_0^y \gamma \mathrm{d}y = \gamma y \tag{5}$$

由式(5) 可知，吊杆上端截面的自重应力最大，大小为

$$\sigma_{\max} = \gamma h \tag{6}$$

式中 h 为拉索两端的高差。

当拉索倾斜时，可由式(1) 推导得下列自重应力为

$$\sigma = \frac{H}{A}\left[\mathrm{ch}\left(\frac{2\beta}{L}x + \alpha\right) - \mathrm{ch}\alpha\right] \tag{7}$$

由式(7) 可知，上端的自重应力最大，大小同式(6)。从式(6) 可知，拉索最大自重应力与拉索两端的高差成正比，同高差的 CFRP 拉索最大自重应力仅为钢拉索 1/5，如采用材料的抗拉标准强度的 0.45 倍作为拉索的设计应力，则钢拉索极限设计长度可达 10447 m，CFRP 拉索可达 72663 m。

当拉索水平时，可由式(1) 推导下列自重应力为

$$\sigma = \frac{H}{A}\left[1 - \mathrm{ch}\left(\frac{2\beta}{L}x - \beta\right)\right] \tag{8}$$

由式(8) 可知，两端的自重应力最大，大小为

$$\sigma_{\max} = \frac{H}{A}(1 - \mathrm{ch}\beta) = \gamma k_c \approx \frac{\gamma^2 L_c^2}{8\sigma} \tag{9}$$

由式(9) 可以看到索自重荷载对拉索的轴向正应力与容重、跨径的平方成正比，与索应力成反比。同跨径和应力的 CFRP 拉索最大自重应力仅为钢拉索 1/25。

4.2　温度作用

温度发生变化时，由于热胀冷缩效应索的状态会发生变化。根据相容性要求，两种状态的索长 S_1 和 S_2 及其相对与同一初始状态的伸长量 ΔS_1 和 ΔS_2 满足 $S_2 - S_1 = \Delta S_2 - \Delta S_1$，取 $e(t_2 - t_1)S_0 \approx et_2 S_2 - et_1 S_1$（$e$ 为热胀系数，t_1 和 t_2 为两种状态的温度）得

$$(1 - et_2)S_2 - \Delta S_2 = (1 - et_1)S_1 - \Delta S_1 \tag{10}$$

由于热胀效应与温差直接有关，因此式(10) 可以写为

$$S_2 - \Delta S_2 = (1 + e\Delta t)S_1 - \Delta S_1 \tag{11}$$

当索受边界约束，则产生温致应力，可以利用式(10) 和式(11) 计算。

当两端相对位置不变，即 L 和 θ 不变，对于小变形索，可近似为下式计算温度荷载应力：

$$\sigma = -eE_{eq}\Delta t \tag{12}$$

式中 E_{eq} 为拉索等效弹性模量，Δt 为温度变化。

在温差与约束相同时，CFRP 无垂度索温度应力仅为钢无垂度索的 1/23，如图 6 所示。当有垂度时，两种索的温度应力皆降低，CFRP 索由于容重小、垂度效应不明显而降低很小，如图 7(图 7 ～ 图 9 中索的初应力为 400 MPa)。采用近似式(12) 和精确式(11) 分析发现近似公式对钢索误差较大，对 CFRP 索误差较小，如图 8 所示采用 Ernst 等效弹性模量近似式(12) 和精确式(11) 的误差(近似

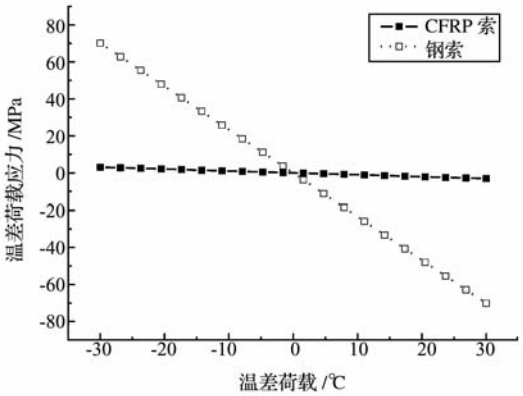

图 6 无垂度索温度应力

Fig. 6 Thermal stress of no sag cable

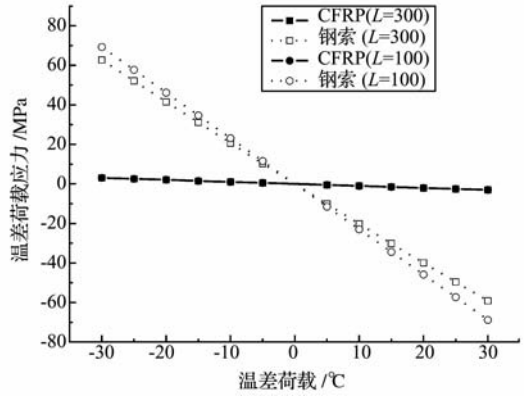

图 7 不同跨径斜拉索温度应力

Fig. 7 Temperature stress of stay cable

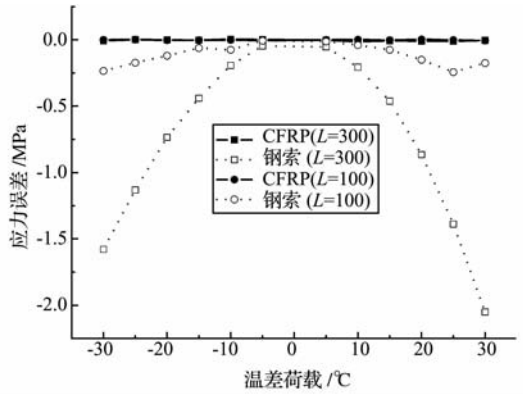

图 8 温度应力误差

Fig. 8 Error in temperature stress

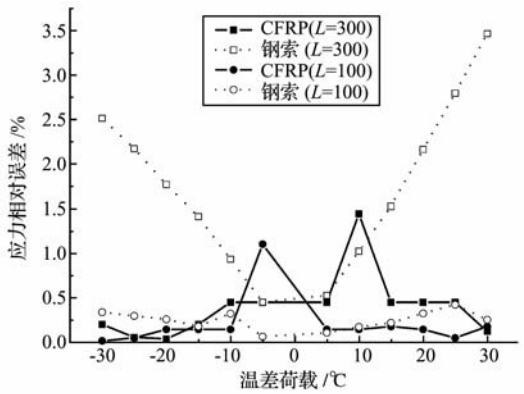

图 9 温度应力相对误差

Fig. 9 Relative error in temperature stress

值减精确值)。分析图 8 还发现近似公式低估了冷缩效应,高估了热胀效应。图 9 用误差与精确值之比表示相对误差,则可以反映 Ernst 等效弹性模量公式的精度,如果以相对误差在 2% 以内为标准,当初应力为 400 MPa 以上、跨径在 300 m 以下,应力变化幅度在(−50 MPa ~ 50 MPa)内 Ernst 公式是准确的。

5 极限长度与承载效率

5.1 拉索的极限长度

拉索垂度的存在不仅增大了拉索轴向柔度,而且减小荷载传递的效率,当拉索下端切线方向变为水平时,承载效率为零,这时斜拉索达到了极限长度 $L_{\max}$,$L_{\max}$ 的大小取决于拉索的密度、设计允许应力与弦线的顷角 θ。文献[8] 给出了一种求解 $L_{\max}$ 的公式为

$$\mathrm{ch}\,\frac{L_{\max}}{\frac{[\sigma]}{\gamma}-\tan\theta L_{\max}}=\frac{\frac{[\sigma]}{\gamma}}{\frac{[\sigma]}{\gamma}-\tan\theta L_{\max}} \tag{13}$$

式(13) 可采用试算法求解。而不适于拉索垂直与水平。垂直的拉索或吊杆的极限长度主要考虑自重应力影响,当自重应力达到允许应力时即为极限长度,可采用式(6) 计算。水平拉索主要承担水平荷载,其极限长度要考虑自重导致剪应力的影响,当自重导致的剪应力达到允许剪应力时,水平拉索长度达到极限长度,可采用计算式为

$$[\tau]=\frac{\gamma L_{\max}}{2} \tag{14}$$

同时水平拉索还要考虑自重应力的影响,当自重应力达到允许应力时,水平拉索长度达到极限长度,可由式(9) 推出的计算式为

$$L_{\max}=\frac{2\sqrt{2}[\sigma]}{\gamma} \tag{15}$$

水平拉索的极限长度 $L_{\max}$ 大小取式(14) 和式(15) 的小值。

采用材料的抗拉标准强度的 0.45 倍作为拉索的允许拉应力,对于钢拉索为 837 MPa,对于 CFRP 拉索为 1147.5 MPa。图 10 所示为钢与 CFRP 拉索弦向倾角从 5° ~ 80° 时的极限跨径长度,从图可以看出在弦向倾角为 35° 时拉索极限跨

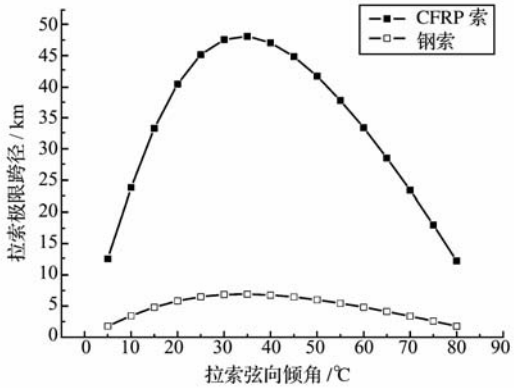

图 10　斜拉索极限跨径随弦向倾角的变化

Fig. 10　Ultimate span of stay cable at different slope

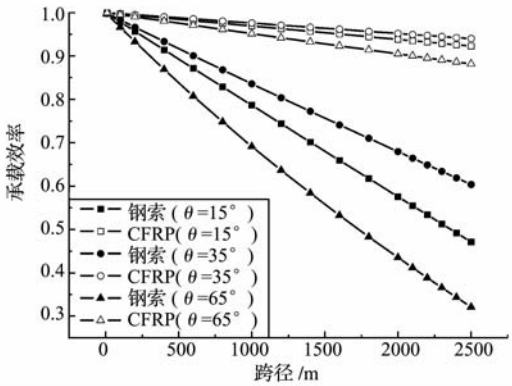

图 12　承载效率随跨径的变化

Fig. 12　Carrying efficiency at different span

径长度最长，钢索 $L_{max}=6920$ m，CFRP 索 $L_{max}=48130$ m。当拉索弦向倾角相同时，CFRP 拉索的极限跨径长度约为钢拉索的 7 倍。垂直钢拉索极限设计长度可达 10447 m，CFRP 拉索可达 72663 m，CFRP 拉索的极限设计长度也约为钢拉索的 7 倍。由于 CFRP 材料的抗剪强度较低，一般取 70MPa～140 MPa，因此 CFRP 水平拉索的极限设计长度较低。同样取抗剪标准强度的 0.45 倍作为允许剪应力，钢拉索取 837 MPa，CFRP 拉索取 45 MPa。通过式(14) 和式(15) 计算得：钢索 $L_{max}=30158$ m，CFRP 索 $L_{max}=5699$ m，另外可以通过在中部设支承来突破水平拉索的极限长度。

5.2　拉索的承载效率

为了达到一定的承载效率，研究表明合理的拉索是极限长度拉索的一部分，如图 11 所示。这里将承载效率定义为有垂度拉索承受竖向荷载的能力 V_b 与理想直线索承受竖向荷载的能力 V_0 之比。采用抛物线近似，可推导得效率比表达式为[8]：

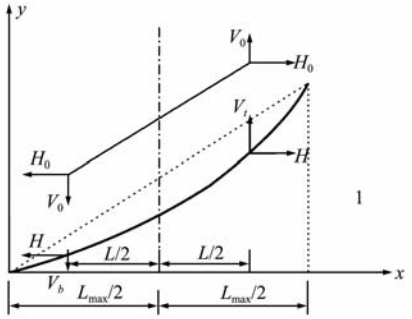

图 11　斜拉索合理长度

Fig. 11　Rational span of stay cable

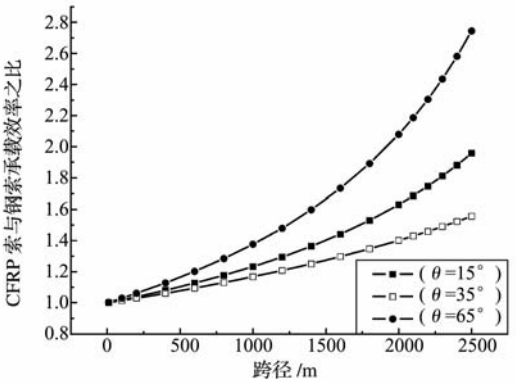

图 13　承载效率之比

Fig. 13　Ratio of carrying efficiency

$$\frac{V_b}{V_0}=\frac{\left(1-\dfrac{L}{L_{max}}\right)}{\sqrt{\cos^2\theta+\sin^2\theta\left(1+\dfrac{L}{L_{max}}\right)^2}} \tag{16}$$

图 12 显示了不同弦向倾角的拉索承载效率随跨径的变化。分析图 12 可知，承载效率随跨径的增大而减小，倾角为 35° 时承载效率最高。如图 13 所示，CFRP 索的承载效率高于钢索，而且随跨径的增大而更明显。

6　结　论

根据解析法分析了 CFRP 索和钢索的垂度效应、极限长度、承载效率和温度作用响应等，得到以下成果：

(1) 当相同的拉索长度、倾角及应力时，CFRP 拉索垂度仅为钢拉索的 1/5。CFRP 的等效弹性模量比钢拉索高，且随跨径的增大，钢拉索的等效弹性模量下降的非常快，而 CFRP 索仍保持较高值。

(2) 同状态的 CFRP 斜索或吊索的自重应力仅为钢拉索 1/5。对于水平的系杆，同跨径与应力的 CFRP 拉索自重应力仅为钢拉索 1/25。

(3) 在温差与约束相同时,无垂度 CFRP 索温度应力仅为无垂度钢索的 1/23。当有垂度时,两种索的温度应力皆降低,CFRP 影响较小。

(4) 在索弦向倾角为 35°时斜索极限跨径最大,钢索为 6.92 km,CFRP 索为 48.13 km。当拉索弦向倾角相同时,CFRP 拉索的极限跨径长度约为钢拉索的 7 倍;垂直钢拉索极限长度可达 10.45 km,CFRP 拉索可达 72.66 km,CFRP 拉索的极限长度也约为钢拉索的 7 倍;水平钢索极限长度可达 30.16 km,CFRP 为 5.67 km。

(5) 拉索的承载效率随跨径的增大而减小,倾角为 35°时承载效率最高。CFRP 索的承载效率高于钢索,而且随跨径的增大而更明显。

参考文献(References):

[1] JUNGWIRTH D, WINDISCH A. Tendons Made of Non-Metallic Materials, Requirements and Economic Application[A]. Non-metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structure[C]. Ghent, Belgium, 1995: 35-40.

[2] HARADA T, MATSUDA H, KHIN M, et al. Development of Non-Metallic Anchoring Devices for FRP Tendons[A]. Non-metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structure[C]. Ghent, Belgium, 1995: 41-48.

[3] 张建东. CFRP 拉索系杆拱桥非线性静力性能研究[D]. 湖南大学,2005. 6-8. (ZHANG Jian-dong. Nonlinearities of Arch Bridge with CFRP Hangers and Tie Bar[D]. Hunan University, 2005. 6-8. (in Chinese))

[4] PATRICK X W, Zou. Long-term properties and transfer length of fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2003, **7**(1): 10-19.

[5] 吕志涛,梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报,2007,**40**(1):54-59. (LU Zhi-tao, MEI Kui-hua. First application of CFRP cables for a cable-stayed bridge in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, **40**(1):54-59. (in Chinese))

[6] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,1995. (LIN Yuan-pei. *Cable-stayed Bridge*[M]. Beijing: People's Communications Press, 1995. (in Chinese))

[7] 李正仁,编译. 关于在直布罗陀海峡最窄处建造碳纤维强化复合材料桥的建议[J]. 国外桥梁,1990,(4): 45-50. (LI Zheng-ren, translator. Suggestion of constructing CFRP bridge at the narrowest point of Gibraltar Strait[J]. *Overseas Bridge*, 1990(4): 45-50. (in Chinese))

[8] 尼尔斯 J·吉姆辛. 缆索支承桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2002:105-107. (Niels J. Gimsing. *Cable Supported Bridges-concept&Design* [M]. Beijing: People's Communications Press, 2002: 105-107. (in Chinese))

Nonlinear mechanic behaviors of CFRP cables

ZHANG Jian-dong*[1], FANG Zhi[2]

(1. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, China;
2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Interest in the use of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in lieu of steel cables in cable-stayed bridges is increasing due to the high-strength, light-weight and corrosion-free properties of such materials. The sag effect, effective modulus, temperature effect and potential ultimate span of CFRP cables have been discussed on the basis of nonlinear comparative studies with steel cables. It shows that CFRP cable is of higher loading efficiency, longer ultimate span and greater effective modulus due to its higher strength and lighter weight, especially to those extra long cables. Its ultimate span is about 7 times of that of steel cable, the thermal stress in carbon cable is only about 5% of that in steel cable at the same temperature difference and boundary condition, and the thermal stresses both in carbon cable and in steel cable with sag will decrease.

Key words: CFRP cables; ultimate span; sag effect; thermal stress