

钢主缆与 CFRP 主缆悬索桥力学性能及极限跨径研究

贾丽君,丛霄,林赞笔

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:运用解析法研究了在现有材料强度的基础上,钢主缆和 CFRP 主缆悬索桥的极限跨径。结果表明,跨径超过 4 500 m 后,钢主缆悬索桥的主缆直径将急剧增大,恒载所占比重超过全桥总荷载的 95%,不宜采用;而 CFRP 主缆悬索桥在跨径超过 5 000 m 后,主缆面积仍能保持平稳增长,且远小于相同跨径下钢主缆所需面积,可行性高。此外,分别对主跨为 1 500、2 000、3 000、4 000 和 5 000m 的钢主缆和 CFRP 主缆单跨悬索桥进行试设计,并对主缆、锚锭及桥塔受力、活载作用下的加劲梁挠度等力学性能进行了对比分析。得出:2 000 m 以下的悬索桥钢主缆具有优势,而 3 000 m 以上的悬索桥采用 CFRP 主缆是可取的。

关键词:钢主缆; CFRP 主缆; 悬索桥; 极限跨径; 力学性能

中图分类号:

文献标识码:A

The study on mechanical properties and ultimate span of suspension bridge with steel cable and CFRP cable

JIA Lijun, CONG Xiao, LIN Zanbi

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: Based on the strength of existing material, the research studies the ultimate span of steel cable and CFRP cable suspension bridge using analytic method. The result shows that the diameter of steel cable will increase sharply and its self-weight will account for 95% of total loads when the span is over 4 500m, which is no more suitable to adopt; however, the area of CFRP cable can still grow steadily when the span is over 5 000 m and its value is far less than the one of steel cable in same span, which is rather feasible. In addition, steel cable and CFRP cable suspension bridge with main span of 1 500, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000m are tried to be designed and comparative analysis of their mechanical properties are made in the study. In conclusion, it is suitable to use steel cable when the span is less than 2 000 m while CFRP cable is more feasible when it is over 3 000m.

Key words: steel cable; CFRP cable; suspension bridge; ultimate span; mechanical properties

悬索桥的发展在过去的一个多世纪实现了跨径的飞跃。然而促成这一进步主要得益于材料强度的提高,常用于制作悬索桥缆索的高强钢丝和钢绞线经过几十年的发展,其材料性能已相当成熟,它提高了桥梁的跨越能力。然而随着经济的发展,为了满足通行需求和海上巨轮的通航,人类开始构思建造跨越外海的超大跨度悬索桥。而悬索桥随着跨径的增长,恒载在总荷载中所占的比例会越来越大,桥梁的承载效率大大降低。在该情况下,钢主缆是否仍然经济适用是值得我们关

注并研究的问题。

为了解决钢主缆可能存在的承载能力不足的问题,也有不少学者提出了利用新材料的想法,这其中碳纤维增强复合材料 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic)就是较为典型的一种,CFRP 材料具有轻质高强、耐腐蚀性好、抗疲劳性等优点,是用于制作缆索支承桥梁缆索结构的理想材料^[1]。国内外已有不少在小跨径的斜拉桥、悬索桥猫道中应用的案例^[2-5]。因此,为探索 CFRP 材料在悬索桥主缆中应用的可行性,研究

收稿日期:2016-04-05

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB036303)

作者简介:贾丽君(1967-),女,浙江上虞人,博士,副教授,主要研究方向为大跨度桥梁。

CFRP 主缆悬索桥的力学性能,并与钢主缆悬索桥进行比较分析是十分必要的。

1 钢主缆悬索桥极限跨径

本文以一座常规的单跨地锚式悬索桥为例,如图 1 所示。 l 为主跨长, l_s 为边跨长, f 为矢高, s 为矢跨比, h 为加劲梁梁高, q_d 为吊杆等代均布荷载, q_b 为加劲梁等代均布荷载, q_l 为活载均布力, P 为活载集中力。各参数取值如表 1 所示。

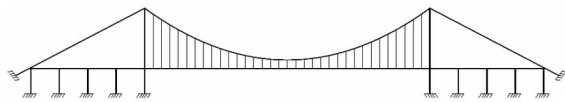


图1 单跨地锚式悬索桥结构形式简图

Fig.1 Diagram of single-span earth-anchored suspension bridge

表 1 参数表

Tab.1 Design parameters

参数	h/m	$q_b/t \cdot m^{-1}$	$q_l/t \cdot m^{-1}$	P/t
取值	3.5	28	3.7	127

在研究悬索桥的极限跨径时,可以按照桥面系荷载与主缆自重之比趋近于零^[6]的条件加以考虑。这里首先分析主缆自然悬挂状态下仅由其自重产生的应力的发展趋势,忽略吊杆自重、加劲梁自重、二期恒载、活载以及风对桥梁的作用,将悬索桥简化为只剩下主缆的结构来分析其极限跨径。目前常用的近似计算方法是将主缆自重简化成沿纵向的均布荷载 q , 然后根据弯矩平衡原理求得跨中主缆水平力 $ql^2/8f$, 进而求得主缆的最大应力。然而由于主缆线形有竖向弯曲,其在垂直方向的密度投影大于钢本身的密度,将主缆自重等效为沿纵向一致的均布荷载 q 会带来一定的误差。为此,本文也将运用积分方法求得主缆的水平分力,并比较简化方法和积分方法之间的误差。

假定主缆线形为二次抛物线($y = ax^2, a = 4f/l^2$), 则计算在主缆自重作用下的最大应力如下^[7]。以半跨主缆为对象,设主缆截面积为 A , 其材料比重为 λ , 跨中和塔顶的主缆拉力分别为 T_z 、 T_s , 对塔顶节点取矩:

$$T_z h = \int \lambda A ds (l/2 - x) = \int_0^{l/2} \lambda A (l/2 - x) \sqrt{1 + 4a^2 x^2} dx \quad (1)$$

主缆的最大拉力 T_s 出现在塔顶:

$$T_s = T_z \sqrt{1 + 16s^2} \quad (2)$$

积分后得到主缆自重作用下的最大应力为 σ_0 , 其中 $b = \sqrt{1 + 16s^2}$:

$$\sigma_0 = \frac{\lambda lb}{2s} \left\{ \frac{b}{\sqrt{16}} + \frac{1}{16s} \ln(4s + b) + \frac{1}{96s^2} [1 - b^3] \right\} \quad (3)$$

将 η 定义为与矢跨比 s 相关的系数,表达如下,其取值如表 2 所示:

$$\eta = \frac{\lambda lb}{2s} \left\{ \frac{b}{\sqrt{16}} + \frac{1}{16s} \ln(4s + b) + \frac{1}{96s^2} [1 - b^3] \right\} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式可得:

$$\sigma_0 = \eta \lambda l \quad (5)$$

表 2 系数 η 取值

Tab.2 The value of η

矢跨比	1/8	1/9	1/10	1/11	1/12
η	1.141	1.251	1.364	1.479	1.596

通过对比计算证明,简化为纵向均布荷载的方法的误差并不大,通常在 2% 以内。

由式 3 可见自重作用下的截面应力与跨径成比例。考虑矢跨比 s 在 1/8 ~ 1/12 之间,主缆采用抗拉强度 1 670 MPa 的钢主缆,主缆安全系数取 2.5, 钢丝应力极限 $\sigma_{lim} = 1\ 670/2.5 = 668$ MPa。1 000 ~ 9 000 m 主跨内,主缆自重作用下的应力随跨径的增长如图 2 所示。相同跨径下,矢跨比越大,主缆自重应力越小。在仅考虑主缆自重,而不计入桥面荷载以及活载的情况下,单根钢主缆的自然悬挂极限跨径在 5 000 ~ 8 000 m 间。

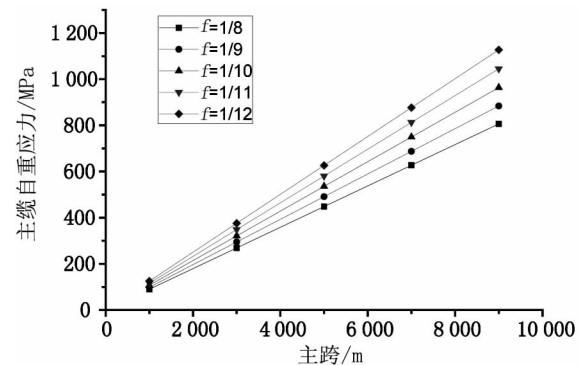


图2 主缆自重应力随跨径增长关系图

Fig.2 Self-weight stress of main cable

图 3 表示悬索桥中跨跨度和恒载的关系。随着中跨跨度的增加,结构自重增加的斜率逐渐加大,且索自重增加的速度快于加劲梁自重增加的速度。跨度不断增长,恒载相应增加,钢索直径越来越大,质量也逐渐增加。

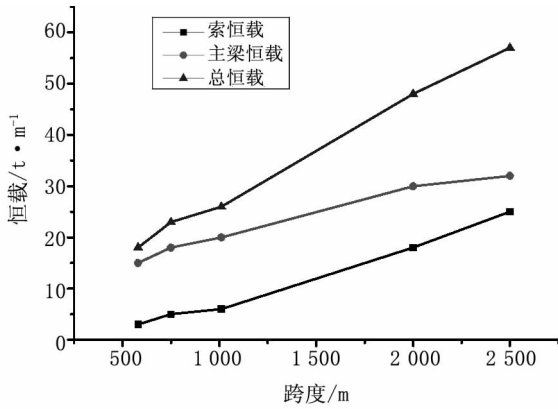


图3 跨度与结构恒载关系图
Fig.3 Dead load of structure

超大跨桥梁的设计主要由结构恒载控制,而缆索材料用量随跨度平方增长。如果采用传统钢缆索,其自重将相当可观,而且由于缆索自重应力占容许应力相当大的比例,这必将限制钢缆索体系桥梁的极限跨径和承载效率。随着跨度的增长,恒载比例逐渐增加,如表3所示^[8],明石海峡大桥的活载仅占到总荷载的不到一成,这就意味着对跨度超过日本明石海峡大桥的悬索桥,其索的安装和张拉将变得非常困难,相对的承载能力效率更低而且安装费用更高。

表3 恒、活载所占比例
Tab.3 Ratio of dead load and live load

	关门桥	金门大桥	明石海峡大桥
跨度/m	712	1 280	1 991
恒载比例/%	75	84	91
活载比例/%	25	16	9

除主缆自重以外,其余荷载产生的主缆应力 σ_1 可以表达为:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{1+16s^2} [(q_d + q_b + q_l)l + 2P]}{8sA_c} \quad (6)$$

由上式可得到满足主缆应力要求的最小截面积为:

$$A_c = \frac{\sqrt{1+16s^2} [(q_d + q_b + q_l)l + 2P]}{8s(\sigma_s - \sigma_0)} \quad (7)$$

其中 σ_s 为主缆允许应力, σ_0 为主缆自重应力。

恒载产生的主缆应力 σ_g 为:

$$\sigma_g = \sigma_0 + \frac{(q_d + q_b)l_s \sqrt{1+16s^2}}{8sA_c} \quad (8)$$

活载产生的主缆应力 σ_q 为:

$$\sigma_q = \frac{(q_d + q_b)l_s \sqrt{1+16s^2}}{8sA_c} \quad (9)$$

$$\text{主缆应力 } \sigma \text{ 为: } \sigma = \sigma_g + \sigma_q = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (10)$$

采用图1和表1的结构及参数,主缆采用钢主缆,允许应力688 MPa,计算得不同跨径和矢跨比下钢主缆所需最小截面积,其与跨径的关系见图4,主缆自重荷载在总荷载中所占比重与跨径的关系见图5。

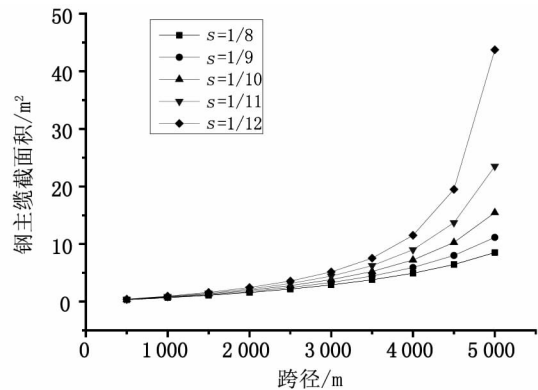


图4 钢主缆截面积与跨径关系图
Fig.4 Section area of steel cable

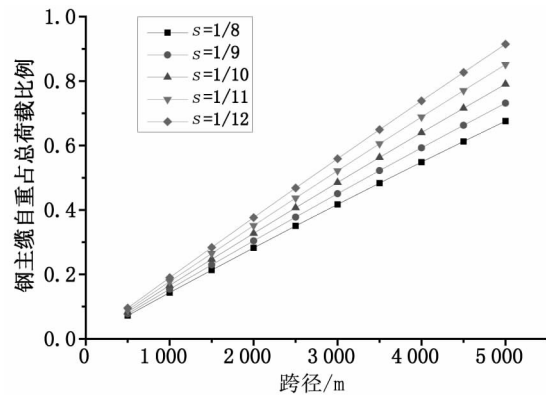


图5 钢主缆自重占总荷载的比例与跨径关系图
Fig.5 Ratio of the weight of steel cable to the total load

采用双索面钢主缆的悬索桥,跨径超过2 000 m以后主缆直径将超过1.2 m。主缆直径过大将使得鞍座位置的主缆产生弯曲应力,造成主缆截面应力不均,大直径主缆也会给锚固构造和主缆安装带来一系列问题。故2 000 m以上跨径的悬索桥宜采用多肢主缆。

如图4所示,只考虑结构静力作用,3 000 m跨径内,主缆截面积随着跨径增加而均匀增长,而跨径超过4 500 m后截面积剧增,主缆截面增加呈发散趋势。如图5所示,钢主缆自重在总荷载中所占的比例也随着跨径增长而明显增加。跨径达到3 000 m时,仅主缆的自重就占去了全桥总荷载的一半左右,若加上加劲梁自重,跨径超过4 500 m

后,恒载所占的比重将超过 95%。因此,钢主缆悬索桥跨径不宜大于 4 500 m。

2 CFRP 主缆悬索桥极限跨径

为提高主缆的允许应力,增加跨越能力,考虑采用 CFRP 主缆。图 6 表示不考虑加劲梁自重和活载,CFRP 主缆仅在自重作用下应力随跨径的增长趋势。从图上看,已有的悬索桥的主缆应力大大低于材料的极限应力,CFRP 主缆的使用能够突破材料强度对极限跨径的限制。

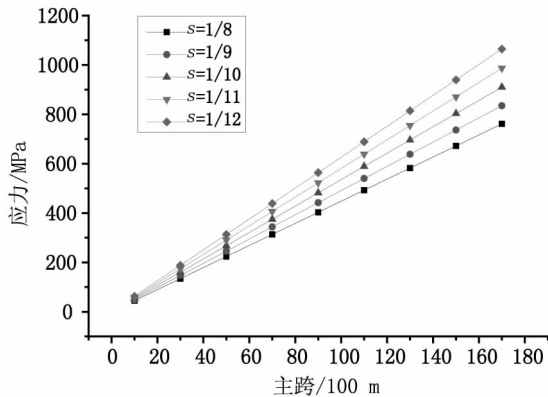


图6 主缆采用CFRP时的极限跨径

Fig.6 Ultimate span of suspension bridge with CFRP cable

尽管目前有试验结果表明 CFRP 强度能达到 2 100 MPa 以上,但目前实际应用中对这一新材料仍采取比较大的安全系数,实际设计中 CFRP 的允许应力大致与钢相同。为了便于比较,取 CFRP 主缆允许应力为 688 MPa,计算得双索面布置情况下所需主缆的总截面积与跨径关系如图 7 所示,恒载应力在总应力中占的比重见图 8。

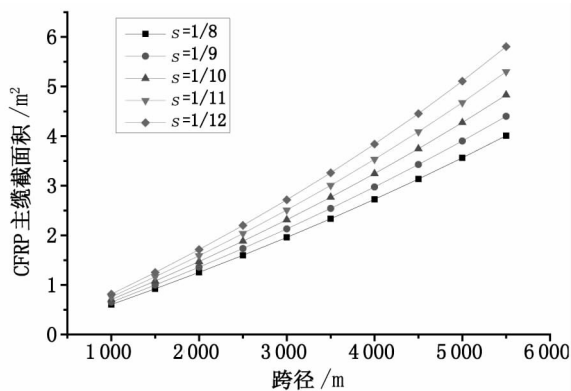


图7 CFRP主缆截面积与跨径的关系

Fig.7 Section area of CFRP cable

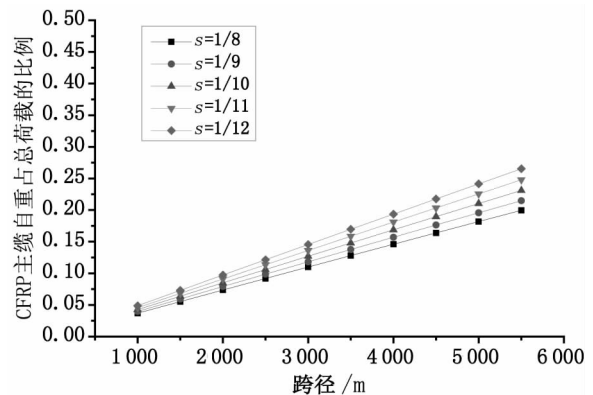


图8 CFRP主缆自重占总荷载的比例

Fig.8 Ratio of the weight of CFRP cable to the total load

与钢主缆相比,主缆若采用 CFRP 材料,达到相同跨越能力所需的主缆面积更少,主缆自重所占比例也会减小。跨径大于 2 000 m 后,主缆截面明显小于钢主缆。跨径超过 5 000 m 后,采用新材料的主缆面积保持平稳的增加,没有出现发散的趋势。由于 CFRP 自重较轻,即使主缆跨径达到 5 000 m,CFRP 主缆自重所占比例仍然较小,5 000 m 范围内主缆自重在总荷载中所占比例小于 1/4,主缆截面大小更多的是由主缆自重以外的其他荷载来决定。这些荷载包括活载与加劲梁自重荷载,近似的将其看作沿桥面均布的荷载 q ,则由荷载 q 引起的主缆水平力为 $H = ql/8s$,若主缆矢跨比 s 和均布荷载 q 保持不变,可知由桥面均布荷载引起的主缆拉力与跨径成正比,综合以上可得 5 000 m 跨径范围内主缆截面积与跨径基本成正比。

根据计算,主缆若采用 CFRP 材料,悬索桥的跨径达到 5 000 m 时,双索面的单根主缆直径为 1.5 m 到 1.8 m,若能采用四根主缆,则单根主缆直径为 1.1 m 到 1.3 m。因此,采用合理的构造措施设计 5 000 m 跨径悬索桥的主缆是可行的,主缆强度将不会成为制约悬索桥跨径的因素。

根据上述分析,可以得到以下两点:(1)若采用钢主缆,跨径超过 4 500 m 后,其主缆面积将急剧增大,由此可见,钢主缆悬索桥最大跨径不宜超过 4 500 m;(2)主缆若能采用 CFRP 材料,主缆强度将不会成为制约悬索桥极限跨径的因素。

3 CFRP 主缆与钢主缆悬索桥静力性能分析

3.1 计算模型

采用钢主缆和 CFRP 主缆,分别对主跨为

表4 各方案的构件设计参数表
Tab.4 Design parameters of each scheme

跨径/m	1 500		2 000		3 000		4 000		5 000	
主缆材料	钢	CFRP	钢	CFRP	钢	CFRP	钢	CFRP	钢	CFRP
主缆根数	2		2		2		2		4	
加劲梁形式	扁平钢箱梁		扁平钢箱梁		NS 方案		NS 方案		WS 方案 NS 方案	
主梁梁高/m	3.0		3.5		3.0		3.0		2.5	
主梁总宽/m	34.3		34.3		50		50		80	

1 500、2 000、3 000、4 000 和 5 000 m 的单跨悬索桥进行试设计^[9],边跨长度均为 0.3*l*,矢跨比均取 1/10。行车道按双向六车道布置,活载取公路 I 级,各方案吊杆和主缆取用相同材料。对于 1 500 和 2 000 m 方案,为避免整体重力刚度过小,CFRP 主缆和钢主缆采用相同面积;对于 3 000~5 000 m 方案,采用主缆等强度原则,用主缆允许应力进行控制。

图 9 为主跨 1 500 和 2 000 m 方案立面图,主梁采用扁平流线型钢箱梁,梁高 *h* 分别为 3.0 和 3.5 m,主梁宽度均为 34.3 m。图 10 为 *L*=3 000、4 000 和 5 000 m 方案总体布置图。主梁形式分为以下两种方案:5 000 m 钢主缆采用四主缆中央宽开槽 WS 方案,主梁高 2.5 m,总宽度为 80 m,见图 11 所示。其余均采用中央窄开槽 NS 方案,主梁高 3.0 m,总宽度为 50 m,见图 12 所示^[10-11]。各方案的构件设计参数如表 4 所示。

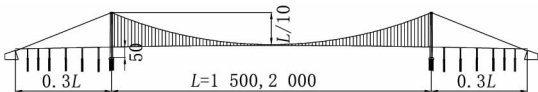


图9 主跨1 500和2 000 m方案立面图
Fig.9 Vertical view of 1500and 2000 m scheme

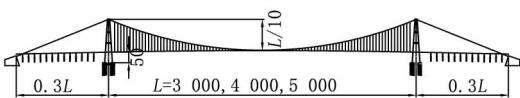


图10 主跨 3 000、4 000、5 000 m方案立面图
Fig.10 Vertical view of 3 000, 4 000 and 5 000 m scheme

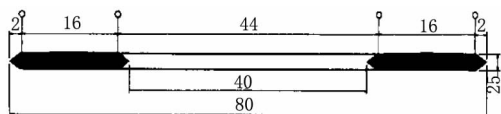


图11 宽开槽WS方案主梁断面(m)
Fig.11 WS cross section(unit:m)

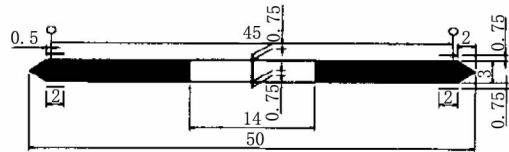


图12 窄开槽NS方案主梁断面(m)
Fig.12 NS cross section(unit:m)

若采用与钢主缆等强度原则进行设计,则 CFRP 主缆面积小于同跨径钢主缆面积,考虑到采用轻质主缆对于重力刚度的影响,活载作用下加劲梁最大挠度很难满足要求。所以采用和同跨径钢主缆悬索桥主缆等面积的设计原则。由于 2 000 m 以下的悬索桥桥面系恒载重量所占比例很大,缆索恒载只占 30%,因此采用 CFRP 材料时主缆最大拉力、塔顶竖直反力和锚碇水平力只比钢主缆方案减少 20%,而活载作用下加劲梁最大挠度却增大 30%,不能满足悬索桥对于挠跨比的要求。为使挠度满足要求,必然采用和同跨径钢主缆悬索桥的主缆抗拉刚度相等的原则来进行设计,CFRP 主缆面积进一步增大,主缆实际应力将远低于允许应力,而且随着主缆自重的增加,塔顶竖直反力和锚碇水平力也将增加,使得主塔和锚碇尺寸加大。在塔和锚碇的造价方面并不比同跨径钢主缆悬索桥有太多优势,综合考虑到 CFRP 材料的价格和实际施工困难,即使未来价格下降和锚固等关键技术的解决,也很难和钢主缆进行竞争。因此 CFRP 主缆的合理跨径应在 2 000 m 以上。

3.2 主缆受力

两种材料主缆的计算结果见表 5 和图 13、14。

表5 缆索自重占总恒载的比例比较表
Tab.5 Ratio of the cable weight to the total load

跨径/m	1 500	2 000	3 000	4 000	5 000
钢/%	28.0	34.2	55.6	68.1	83.2
CFRP/%	9.0	11.7	18.3	22.	25.8

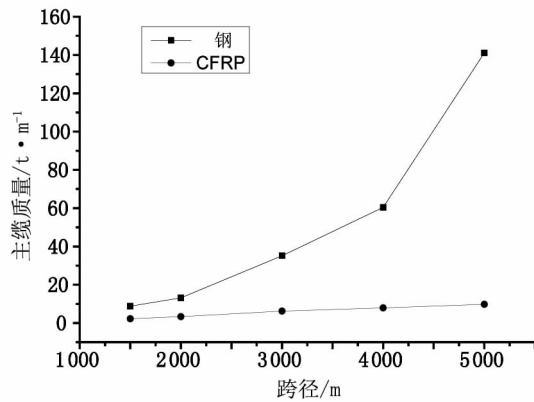


图13 主缆自重与跨径关系图

Fig. 13 Self-weight of cable

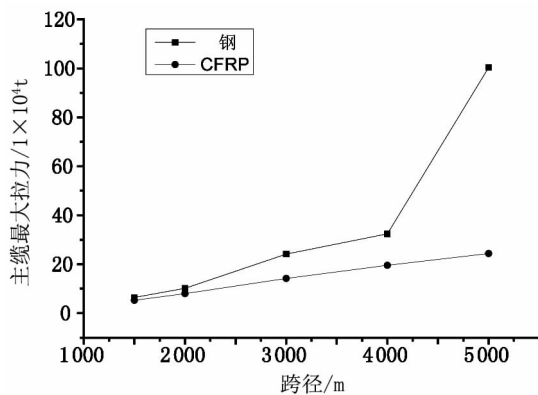


图14 主缆最大拉力与跨径关系图

Fig. 14 Maximum tension of cable

由计算结果可以得出:

(1) 跨径越大, 钢主缆和 CFRP 主缆的每延米重量相差就越大, 达到 5 000 m 时, CFRP 主缆每延米重量仅是钢主缆的 7%。

(2) 无论是采用钢主缆还是 CFRP 主缆, 缆索自重占总恒载的比例均随跨径的增长而增加, 且几乎呈线性递增, 但变化趋势后者较前者更加平缓。

(3) 在超大跨度悬索桥中, 钢主缆的大部分应力都用来平衡其自重, 承载效率较低。3 000 m 时钢主缆自重占总恒载的比例达到 55.6%, 5 000 m 时达到 83.2%。

(4) 对于主缆最大拉力, 钢主缆悬索桥明显大于 CFRP 主缆悬索桥, 而且随跨径的增加越来越明显。

(5) 跨径达到 4 000 m 以上时, 钢主缆的最大拉力急剧增大, 而 CFRP 主缆拉力的变化规律不变。可见跨径达到 4 000 m 以上时, 采用钢主缆的经济性能相当差, 而 CFRP 主缆悬索桥更具优势。

3.3 锚碇及主塔受力

锚碇和主塔受力的主要计算结果见图 15、16。

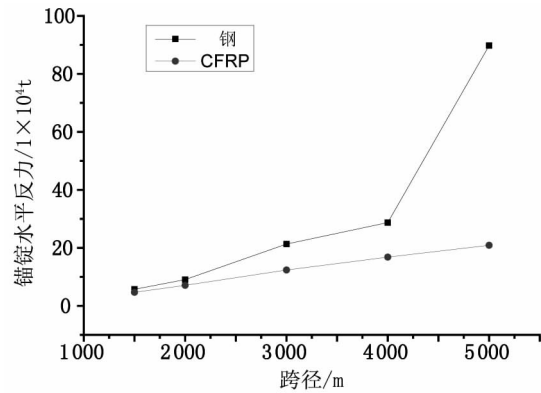


图15 锚碇水平反力与跨径关系图

Fig. 15 Horizontal reaction force of anchor

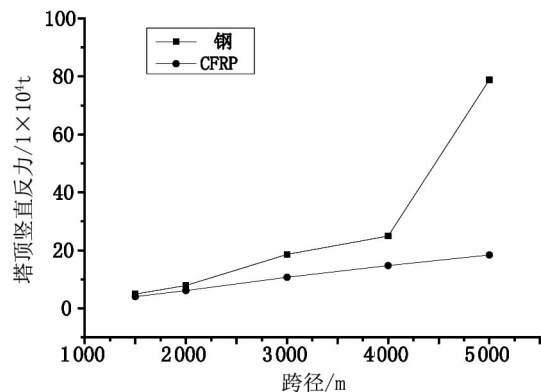


图16 塔顶竖直反力与跨径关系图

Fig. 16 Vertical reaction force of tower top

由计算结果可以得出, 对于两种形式主缆, 锚碇水平力和塔顶竖直反力的变化规律基本与主缆最大拉力一致, 即:

(1) 钢主缆悬索桥的锚碇水平力和塔顶竖向反力大于 CFRP 主缆悬索桥, 而且随跨径的增加越来越明显。

(2) 跨径大于 4 000 m 后, 钢主缆悬索桥锚碇水平力和塔顶竖向反力急剧增大, 而 CFRP 主缆的变化规律不变。

(3) 使用 CFRP 材料后, 在主缆自重大幅度减少的同时, 锚碇水平力和主塔反力减少的幅度也非常大, 因此锚碇和主塔的设计将更加容易, 尺寸可以进一步减小。而对于悬索桥的造价而言, 锚碇和主塔的费用占总投资的比例是很高的, 这两部分成本的降低是十分可观的。

3.4 活载作用下加劲梁竖向挠度

两种材料在活载作用下加劲梁竖向挠度见表6。

表6 活载作用下加劲梁竖向挠度比较表/m

跨径/m	1 500	2 000	3 000	4 000	5 000
钢	5.26	5.73	6.31	6.99	7.72
CFRP	6.46	7.41	9.35	12.09	15.12
相差率/%	22.8	29.3	48.2	73.0	95.9

由计算结果可以得出:

(1) 由于钢主缆悬索桥的主缆自重占总荷载比例的比例很大,活载相对较小,所以结构重力刚度大,活载作用产生的挠度变化幅度不大,跨径从1 500~5 000 m 竖向挠度仅增加46.8%;CFRP 缆索体系因自重大幅度降低,导致重力刚度下降,活载占总荷载的比例相对增大,因而对活载更敏感,竖向挠度大幅度增加,跨径从1 500~5 000 m 竖向挠度增加134.1%。

(2) 跨径5 000 m 时,CFRP 较之钢主缆挠度增大95.9%。但采用等强度原则设计时,CFRP 缆索体系挠跨比可以控制在1/300 以下,因此仍然是可以接受的。

从上述分析中可知,虽然CFRP 主缆悬索桥的挠跨比满足要求,但挠度绝对值过大,为了改善行车舒适度,要求进一步减少活载挠度。考虑到CFRP 的主缆面积在主缆等强度原则控制下,5000 m 时仅为钢主缆面积的30.8%,因此可以进一步增大CFRP 主缆面积和加劲梁的重量,加大整体重力刚度。由于CFRP 主缆的拉力以及锚碇水平力和主塔反力较小,也可以考虑减小矢跨比,从而达到增加整体刚度的目的。矢跨比减小的同时,主塔高度也随之降低。对于主跨5 000 m 的悬索桥,若采用1/10 的矢跨比,桥面以上的主塔高度就将超过500 m,施工难度大。

综上所述,采用CFRP 材料作主缆,导致重力刚度下降的问题是可以解决的。而CFRP 主缆体系在其他静力分析方面,当跨径超过3 000 m 时,都具有钢主缆不可替代的优势,对于小于2 000 m 的跨径,优势不明显;超过3 000 m 的悬索桥一般都是跨海大桥需要的跨径,CFRP 主缆在防腐和疲劳方面更有优势。

因此,CFRP 材料用作3 000 m 跨径以上悬索桥的主缆是可取的。

4 小结

1) 钢主缆悬索桥在跨径超过4 500 m 以后,其主缆面积急剧增大,因此最大跨径不宜超过4 500 m;主缆若采用CFRP 材料,则主缆强度将不再成为制约悬索桥极限跨径的因素。

2) 对于2 000 m 以下跨径的CFRP 主缆悬索桥,为使活载挠度满足要求,需采用的主缆面积较大,甚至比同跨径钢主缆悬索桥的主缆面积更大,使得主缆实际应力远低于允许应力,相当不经济,因此CFRP 主缆悬索桥的适用跨径不应小于2 000 m。

3) 跨径达到3 000 m 以上时,在主缆、锚碇和主塔的用量及受力方面,CFRP 主缆悬索桥与钢主缆悬索桥相比更具优势。通过减小矢跨比、增大CFRP 主缆面积和加劲梁的重量等方法,可以解决因采用CFRP 主缆而导致的重力刚度下降问题。

参考文献:

- [1] 张元凯,肖汝诚. FRP 材料在大跨度桥梁结构中的应用展望[J]. 公路交通科技,2004(4):59-62.
- [2] 邓宇. 碳纤维(CFRP)预应力混凝土梁挠度的试验研究[D]. 南宁:广西大学,2007.
- [3] 邹晓文. 法国拉胡安市一座合成材料缆索斜拉桥[J]. 中国三峡建设,2003,12:47.
- [4] 刘荣桂. 中国桥梁工程学术研究综述 2014[J]. 中国公路学报. 2014,27(5):6~8.
- [5] 郑文英,赵慧,王建祥. CFRP 加固技术在某工程中的应用[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2012,29(1):23-25.
- [6] LARSEN A, VEJRUM T, ESDAHL. Vortex models for aero elastic assessment of multi element bridge decks. Bridge Aerodynamics [M]. Larsen & Eisdahl (eds.). Balkema. Rotterdam. 1998. 313-325.
- [7] 潘永仁,杜国华,范立础. 悬索桥恒载结构几何形状及内力的精细计算[J]. 中国公路学报,2000,10(4):33-36.
- [8] HONSHU - SHIKOKU BRIDGE AUTHORITY. The Akashi Kaikyo Bridge Design and Construction of the World's Longest Bridge [R]. Japan, October. 1998.
- [9] 雷俊卿. 悬索桥设计[M]. 北京:人民交通出版社. 2002.
- [10] 项海帆,葛耀君. 悬索桥跨径的空气动力极限[J]. 土木工程学报,2005,38(1):60-70.
- [11] UEDA T. TANAKA T. and MATSUSHITA Y. Aerodynamic stabilization for super long - span suspension bridges. Proc. IABSE Symposium - Long - Span and High - Rise Structures[C]. Kobe, 1998:721-728.

(责任编辑 李军)