

文章编号:1000-582X(2012)08-026-08

# 大跨度 CFRP 缆索悬索桥的静力性能

李 扬

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘 要:**基于分段悬链线法和通用有限元程序,提出了一套悬索桥静力性能分析的方法和步骤,并利用该方法对主跨为 2 000~5 000 m 的悬索桥静力性能进行了对比研究,验证了 CFRP 缆索悬索桥的静力优势和可行性。针对此类桥型刚度较小的缺点,对跨径为 2 000 m 的 CFRP 缆索悬索桥的刚度性能进行了参数分析,考虑的设计参数包括:桥跨布置方式、矢跨比、边中跨比、主梁抗弯惯矩、桥塔抗弯惯矩和中央扣。最后提出了改善结构刚度设计的建议。

**关键词:**悬索桥;碳纤维;CFRP;静力性能;刚度;参数分析

**中图分类号:**U442; U448.25

**文献标志码:**A

## Study on static mechanics of long span suspension bridge with CFRP cable

LI Yang

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute(Group) Co. Ltd., Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** This paper proposes an analysis method for the static mechanics of suspension bridges based on segmental catenary and FEM software. A comparative research on mechanics of suspension bridge with a span of 2 000~5 000 m is conducted according to the proposed method, and CFRP suspension bridges are proved advantageous and practicable. A parametric study for the deflection performance of 2 000 m CFRP suspension bridge is executed in order to enhance its stiffness, where the span arrangement, rise to span ratio, side to main span ratio, inertia of girder and tower, and the central buckle are considered, respectively. A series of design suggestions for improving the structural stiffness are proposed.

**Key words:** suspension bridges; carbon fiber; CFRP; static mechanics; stiffness; parametric study

近年来随着经济的飞速发展,桥梁建设逐步进入建造跨海大桥的新时代<sup>[1-4]</sup>。传统悬索桥面临极大的挑战。一方面,悬索桥的跨径记录即将达到 3 300 m(在建的墨西拿海峡大桥)<sup>[5-6]</sup>,而传统钢缆索悬索桥的极限跨径仅为 5 000~6 000 m<sup>[7-8]</sup>,主缆自重过大降低了悬索桥的跨越能力,使得结构承载效率低下、造价高昂,同时增大了施工难度。另一方面,海水中富含对钢材具有腐蚀作用的成分,且海面上湿度较大、环境复杂,钢主缆极易受到腐蚀,而主缆作为悬索桥的生命线通常不可更换,一

旦发生腐蚀后果将是灾难性的。

主缆是悬索桥的主要承重构件,为了获得更好的跨越能力和抗腐蚀能力,人们逐渐将目光投向主缆材料的变更上来。相对于钢材,CFRP 材料具有轻质高强的特点,并且抗腐蚀性能很好,因此成为目前替代钢材作为主缆材料的最佳选择。然而,主缆材料的变更必然使得悬索桥的受力性能发生巨大的改变,需要进行专门的研究。目前对于 CFRP 缆索悬索桥静力性能的研究往往

局限于 2 000 m 跨径以内的中等跨度水平,得出的结论也较为局限,例如按照“等轴向刚度原则”<sup>[9-12]</sup>设计 CFRP 主缆以提高结构刚度的建议并不适用于超大跨度的情况。

文中将针对以上问题,结合解析法和有限元法对主跨为 2 000~5 000 m 的 CFRP 缆索悬索桥的静力性能进行对比研究,然后对其刚度性能进行参数分析,提出改善结构刚度的一些建议和措施。

## 1 悬索桥静力计算方法

文中采用的悬索桥静力计算方法包括 2 个主要环节,即主缆成桥状态的解析计算和基于有限元程序的全桥受力分析。主缆的成桥状态是指成桥时的主缆线形和索力,可以利用分段悬链线方法按照“先中跨后边跨”的顺序求解获得。本节着重讨论如何进一步利用有限元程序对悬索桥进行全桥静力计算。计算的总体思路是先进行成桥状态的静力分析,再进行成桥后的活载效应分析。具体步骤为:

1) 根据已知资料初步估计悬索桥各构件的尺寸。

2) 根据理想的主梁受力模式(如刚性支撑连续梁、弯曲能量最小等<sup>[13]</sup>),采取相应的方法获得主梁各吊点的反力,并根据初估的吊索和索夹自重计算上吊点拉力。

3) 利用分段悬链线法<sup>[13]</sup>,计算得到各跨主缆线形及索力。

4) 按照主缆索力修正主缆截面,同时根据主缆线形更新各吊索的长度及其上吊点拉力,重新计算主缆的线形及索力。重复该步骤,直至主缆各节点坐标向量变化值的欧几里德范数小于某一容许误差。

5) 建立有限元模型,施加所有恒载。根据各吊索受力,设置吊索单元初应变。

6) 按照已经求得的主缆索段受力,设置主缆单元初应变。在节点坐标确定的情况下,各主缆索段的初应变都是水平拉力  $H$  的函数,在有限元程序中可利用数组存储。按照索塔所受的初始轴力(即为中、边跨主缆在塔顶处竖向力之和),设置索塔的单元初应变。

7) 设置好分析选项(包括分析类别、非线性选项、方程求解策略、收敛准则等),求解并提取塔顶及主梁的竖向位移。

8) 若塔顶及主梁的竖向位移均小于  $10^{-4}$  m(或其它容许误差),则塔顶的水平位移自然也会很小,此时所得计算结果即为悬索桥的真实成桥受力结果;若塔顶或主梁位移不满足要求,则利用二分法修正主缆及索塔初应变值,重复(6)~(8)步骤,直至满足要求为止。

9) 同时施加恒载和活载,进行悬索桥的活载响应计算。

综上所述,用有限元程序进行悬索桥全桥静力分析的流程如图 1 所示。

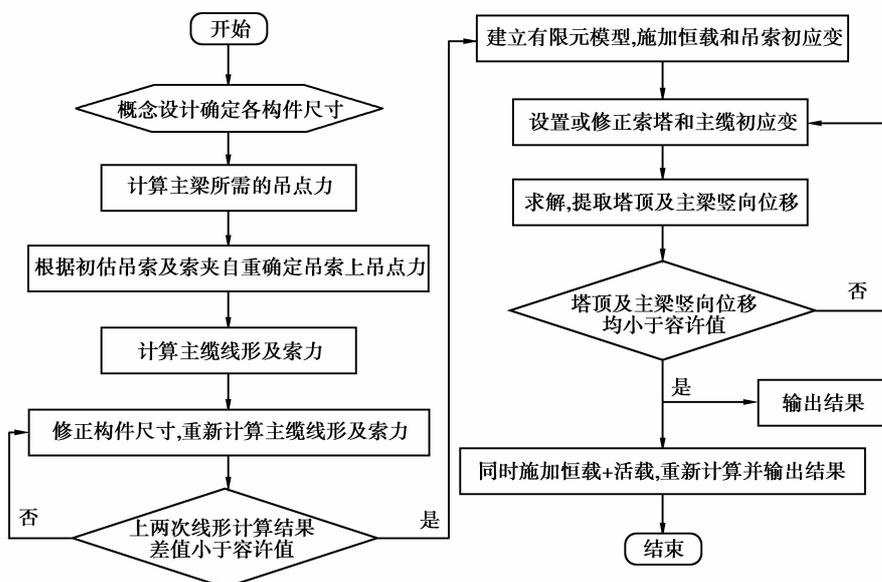


图 1 利用有限元程序进行悬索桥静力分析的步骤

## 2 CFRP 缆索悬索桥的静力性能对比分析

利用前文提出的计算方法,对跨径 2 000~5 000 m 的 CFRP 缆索悬索桥进行静力性能对比分析,从而研究其相对于传统悬索桥的静力优势。为了方便讨论,此处涉及的悬索桥方案均为单跨布置。

### 2.1 悬索桥方案简介

总体结构布置如图 2 所示。矢跨比取常见的 1/10,边中跨比取 0.3。标准吊索间距取 25.5 m,边吊索至桥塔中心线距离约 31 m(根据不同的跨径,吊索间距稍有调整,调整幅度小于 0.2 m)。

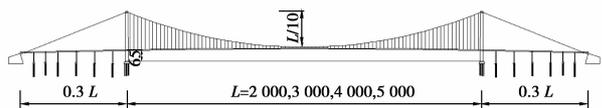


图 2 悬索桥结构总体布置图(单位:m)

主梁采用扁平钢箱梁,材料以 Q345qD 为主,截面面积为  $1.501 \text{ m}^2$ (考虑横隔板等因素,主梁自重集度取  $150 \text{ kN/m}$ ),竖向抗弯惯矩  $4.959 \text{ m}^4$ ,侧向抗弯惯矩  $90.225 \text{ m}^4$ ,抗扭惯矩  $16.037 \text{ m}^4$ 。桥塔采用混凝土桥塔,材料为 C55~C60。缆索材料的主要性能参数见表 1。

表 1 缆索材料的主要性能参数

参数名称	高强度钢丝		CFRP	
	主缆	吊索	主缆	吊索
抗拉强度/ MPa	1 860	1 770	2 000	2 000
弹性模量/ MPa	$2.0 \times 10^5$	$1.95 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$
容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^3$ )	78.5	78.5	17.65	17.65
运营期 安全系数	2.2	3.0	3.0	4.0
容许应力/ MPa	845	590	667	500
线膨胀 系数/ $^{\circ}\text{C}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$0.68 \times 10^{-6}$	$0.68 \times 10^{-6}$

活载为公路 I 级,双向六车道,不考虑人行荷载;二期恒载按  $70 \text{ kN/m}$  计算;温度荷载取温热地区有效温度标准值,即整体升温  $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降温  $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;设计风速取百年不遇条件下的上海地区风速,即为  $33.8 \text{ m/s}$ 。

悬索桥的有限元模型如图 3 所示。

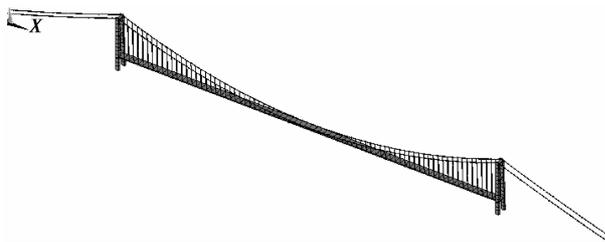
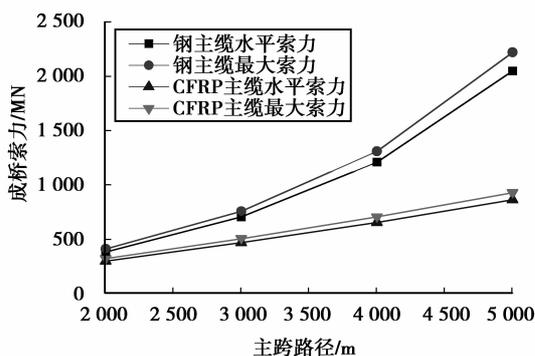


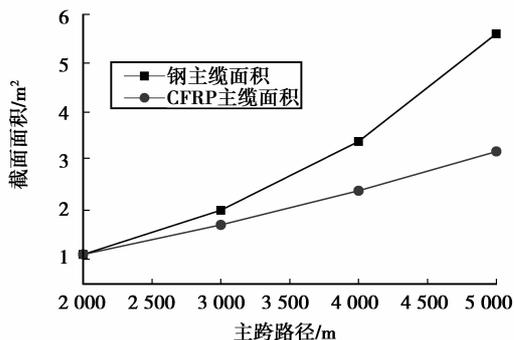
图 3 悬索桥有限元模型

### 2.2 静力性能对比

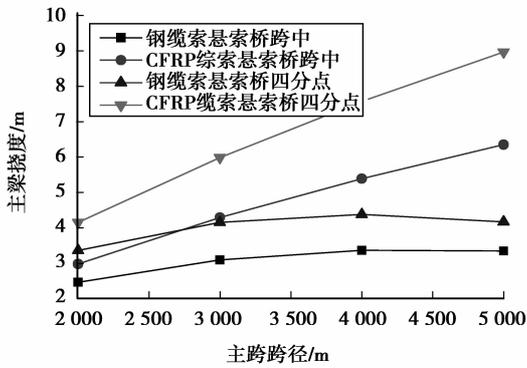
静力性能的指标有很多,文中选取以下几个关键指标进行对比:主缆成桥索力和所需截面积;汽车活载作用下的主梁最大挠度、塔顶最大水平位移和塔底最大弯矩;温度作用下的主梁跨中挠度;静风作用下的主梁最大横向位移和弯矩。计算结果如图 4 所示。



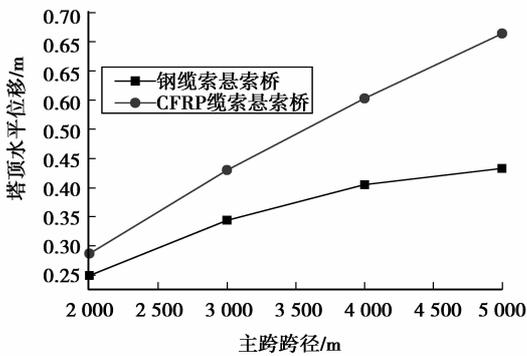
(a)主缆成桥索力



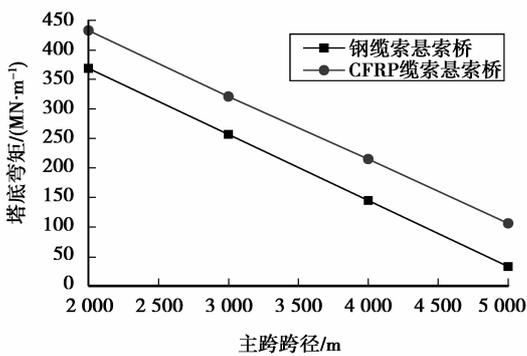
(b)主缆所需截面积



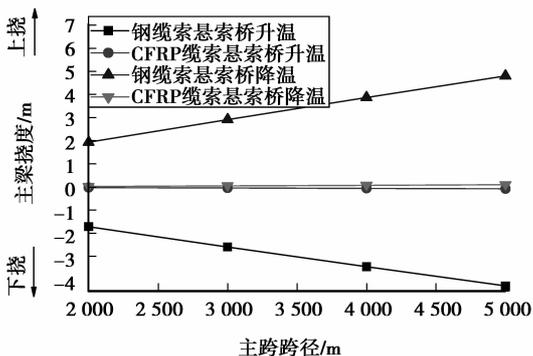
(c) 车载下的主梁最大挠度



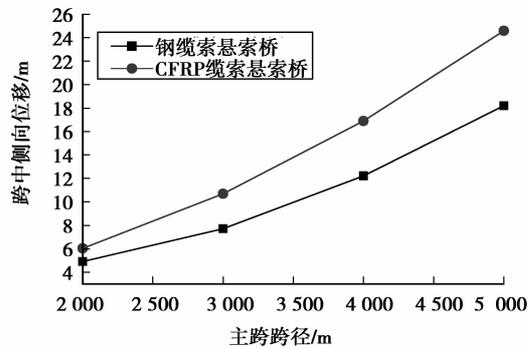
(d) 车载下的塔顶最大水平位移



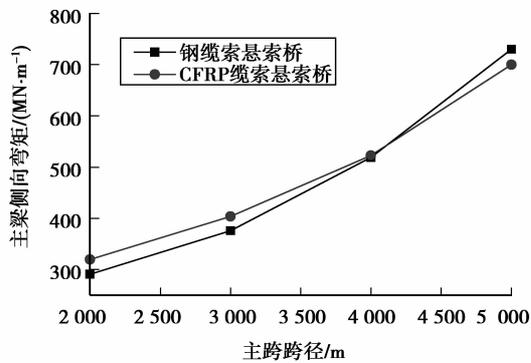
(e) 车载下的塔底最大弯矩



(f) 温度作用下的主梁挠度



(g) 静风作用下的主梁侧向位移



(h) 静风作用下的主梁侧向弯矩

图 4 静力性能对比结果

从以上分析可以看出,与传统钢缆索悬索桥相比,CFRP 缆索悬索桥在静力性能方面的优势主要有以下 2 个方面。

1) 大跨度 CFRP 缆索悬索桥的成桥索力、所需的主缆面积均远小于钢缆索悬索桥,2 000 m 以内的优势尚不突出,当增大时其优势也越来越明显。这一点从抛物线理论公式中也可以得到验证,此处仅作简要分析。假设在悬索桥主跨内作用的荷载分别为:加劲梁自重  $g_d$ 、主缆自重  $g_c$ 、吊索自重  $g_h$ 、均布车载  $q$  以及跨中的集中车载  $P$ ;同时令缆索的容重和容许应力分别为  $\gamma_c$  和  $[\sigma_c]$ ,则按照抛物线理论可得主跨主缆所需的截面计算公式为<sup>[14-15]</sup>

$$A_c = \frac{[(g_d + g_h + q)l + 2P] \sqrt{l^2 + 16f^2}}{8[\sigma_c]f - \gamma_c l \sqrt{l^2 + 16f^2}} \quad (1)$$

由于 CFRP 的容重远小于钢材容重,因此可以降低 CFRP 缆索悬索桥所需的主缆面积。然而还应注意 CFRP 的容许应力比钢材稍小(见表 1),会削弱容重小带来的优势。因此当跨径较小时,两类悬索桥的主缆面积相差不大,只有跨径较大时材料容重的优势才能体现得越来越明显,如图 4(a)所示。

缆索面积和成桥索力的降低不仅有利于提高悬索桥的承载效率,还有助于减小锚碇、主塔和基础的规模,节省综合造价。

2)CFRP 缆索悬索桥几乎不受温度荷载的影响,温度荷载作用下的主梁挠度小于 5 cm,而钢缆索悬索桥则高达数米。这主要是因为 CFRP 材料的线膨胀系数远小于钢材。

由于结构重量降低,且 CFRP 材料弹模较小,因此 CFRP 缆索悬索桥有结构刚度较小的缺点,具体表现为:①汽车活载作用下的主梁挠度、塔顶位移均大于钢缆索悬索桥,而且刚度下降还会造成较大的塔底弯矩。②横风作用下的主梁位移也较大。

需要指出的是,CFRP 缆索悬索桥的上述缺点仍是可接受的。例如,汽车活载、静风荷载作用下的主梁位移并未超出规范规定的安全范围(分别是  $L/300$  和  $L/150$ );塔底弯矩虽然较大,但其随着跨径增大而迅速减小,并不会对大跨度悬索桥的主塔安

全造成影响;静风荷载下的主梁侧向弯矩变化不大。因此可以认为 CFRP 缆索悬索桥在静力上是具有可行性的。

### 3 CFRP 缆索悬索桥的刚度参数分析

为了更好地把握其刚度特性,优化设计参数提高结构刚度,以 2 000 m 跨径为例,对 CFRP 缆索悬索桥的刚度进行参数分析。考虑的设计参数包括:桥跨布置方式、矢跨比、边中跨比、主梁抗弯惯矩、桥塔抗弯惯矩和中央扣。

#### 3.1 桥跨布置方式的影响

图 5 绘出了在全桥满布车载、仅半跨布置车载工况下的主梁变形图。从图中可以看出,不论何种活载工况,三跨悬索桥的主梁挠度均大于单跨悬索桥。这是因为三跨悬索桥的边跨主缆受到桥面荷载的作用,使其垂度大为增加,从而削弱了边跨主缆的锚固作用。因此,在设计 CFRP 缆索悬索桥时推荐考虑单跨的布置方式以提高结构刚度。

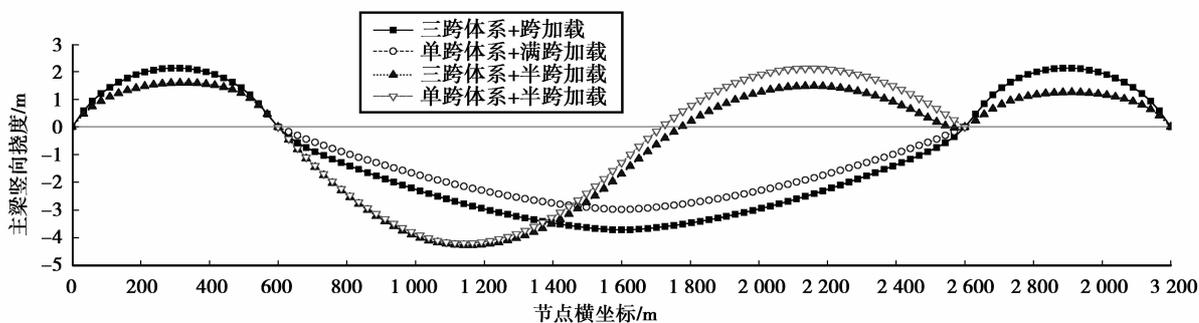


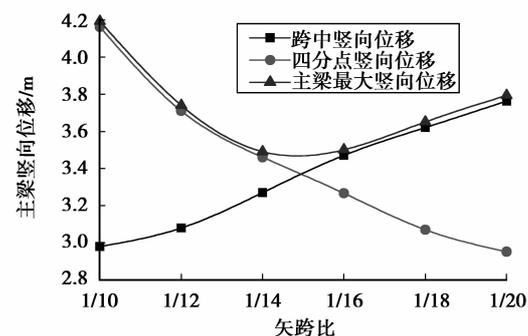
图 5 车载下的单跨、三跨悬索桥主梁变形图

#### 3.2 矢跨比的影响

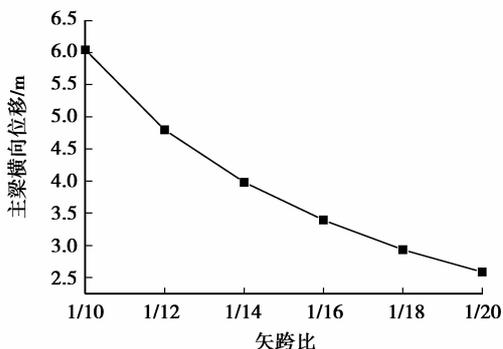
为方便讨论,下面均以单跨 CFRP 缆索悬索桥为研究对象。通过计算得到主梁在车载、静风荷载作用下的挠度与矢跨比的关系如图 6 所示。

及静风作用下的跨中位移均大幅降低,而跨中挠度则逐步增大。当矢跨比大于 1/15 时,适量降低矢跨比可以减小主梁最大竖向挠度;但当矢跨比小于 1/15 时,降低矢跨比反而会增大主梁最大竖向挠度。

可见,随着矢跨比的减小,主梁四分点挠度以



(a) 车载下的主梁竖向位移

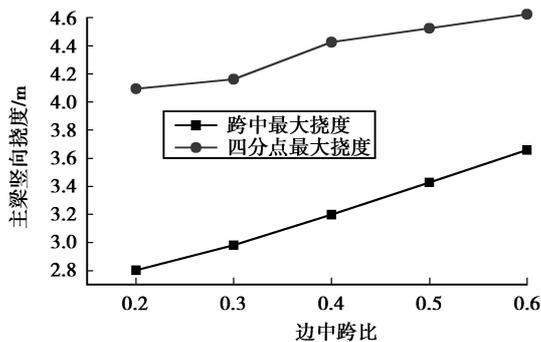


(b) 静风作用下的主梁横向位移

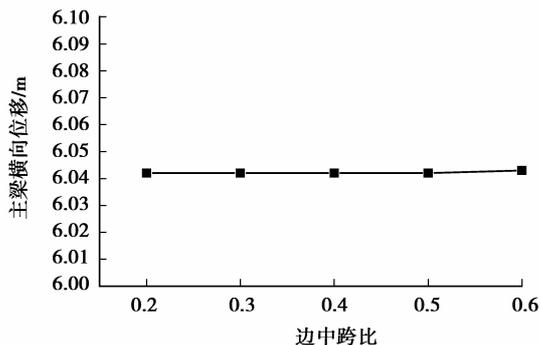
图 6 主梁位移与矢跨比的关系

### 3.3 边中跨比的影响

令矢跨比为 1/10, 将边中跨比从 0.2 逐渐改变到 0.6, 计算得到主梁在车载、静风荷载作用下的挠度与边中跨比的关系如图 7 所示。



(a) 车载下的主梁挠度



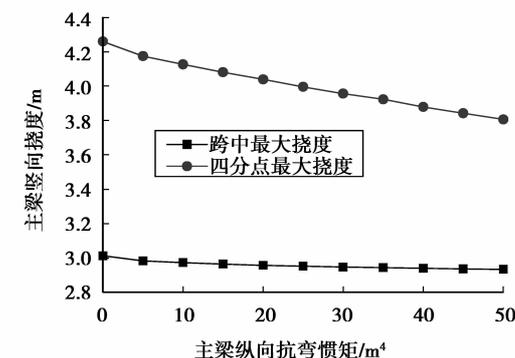
(b) 静风作用下的主梁跨中位移

图 7 主梁位移与边中跨比的关系

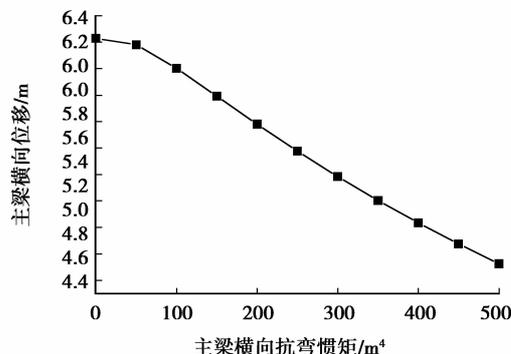
由图可知, 汽车荷载作用下的主梁挠度随边中跨比增大而增大, 而静风作用下的主梁横向位移则几乎不受边中跨比的影响。因此, 减小边中跨比可以提高结构竖向刚度, 但对侧向刚度没有帮助。

### 3.4 主梁抗弯惯矩的影响

主梁竖向抗弯惯矩对其竖向挠度的影响、横向抗弯惯矩对其横向位移的影响分别如图 8 所示。



(a) 车载下的主梁挠度



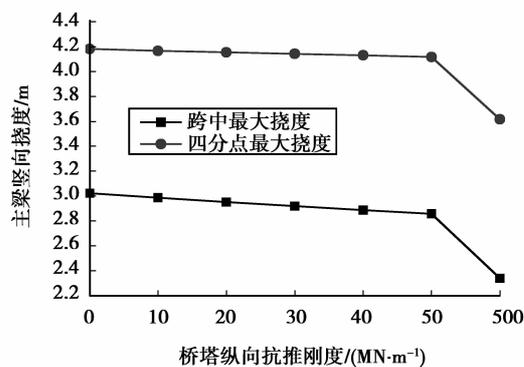
(b) 静风作用下的主梁跨中位移

图 8 主梁位移与其抗弯惯矩的关系

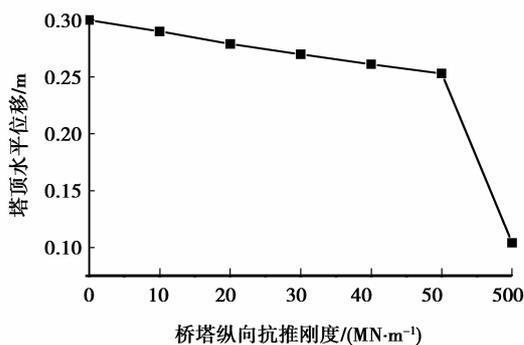
可以看出: 1) 主梁竖向挠度随着竖向抗弯惯矩的增加有所减小, 但变化幅度不大, 说明主梁刚度对结构整体竖向刚度的贡献极小; 2) 主梁横向抗弯惯矩增加时, 静风作用下的侧向位移随之减小。因此在条件允许的情况下, 可以增加主梁横向抗弯惯矩 (如增大梁宽) 以达到减小静风位移的效果。

### 3.5 桥塔抗推刚度的影响

改变桥塔的纵向抗推刚度, 计算得到其对主梁挠度、塔顶水平位移的影响关系曲线, 如图 9 所示。



(a) 主梁挠度



(b) 塔顶位移

图 9 车载下的主梁、塔顶位移与桥塔抗推刚度的关系

由图可看出:1)当桥塔抗推刚度从 0 变化到 50 MN/m 时,主梁挠度、塔顶位移变化均很小,说明桥塔的抗推刚度对全桥总体刚度的贡献十分有限;2)当桥塔抗推刚度变化至 500 MN/m 时,主梁挠度、塔顶位移均较前面有较大幅度下降,尤其是塔顶位移,从 3 cm 骤降至 1 cm。以上现象说明,当桥塔纵向呈独柱型式时,增加桥塔抗推刚度不能有效改善结构刚度,但是当主塔采用抗推刚度很大的 A 型桥塔时(抗推刚度可达 500 MN/m 以上),就能够有

效增强结构刚度。

### 3.6 中央扣的影响

一些文献指出,在跨中设置中央扣可以限制主缆和主梁之间的相对变形,从而增加结构刚度<sup>[16]</sup>。在前述的基本体系悬索桥上设置中央扣,对比设置前后的主梁变形,如图 10 所示。

可以看出,普通体系和中央扣体系的曲线几乎重合,说明中央扣并不能有效提高整体结构的刚度。

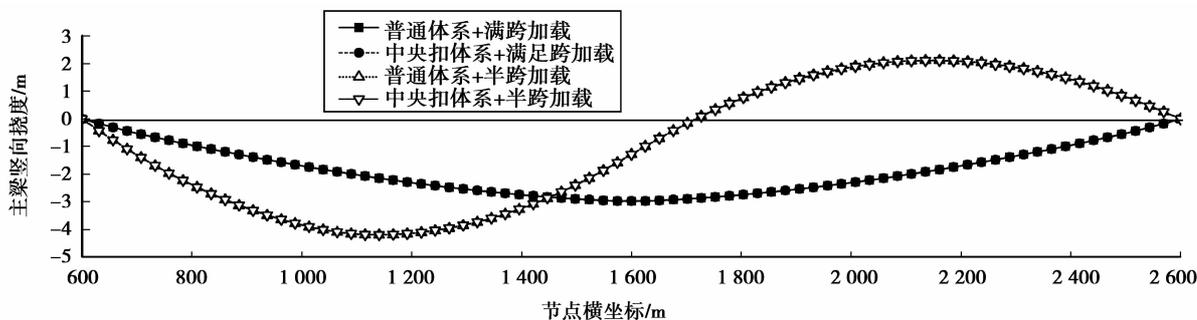


图 10 车载作用下设置中央扣前后的主梁变形图

## 4 结 论

讨论了结合解析法和有限元程序 ANSYS 对悬索桥进行静力分析的方法和步骤,然后对主跨 2 000~5 000 m 悬索桥的静力性能进行了对比研究,总结了 CFRP 缆索悬索桥的优势及不足,并证明了该桥型的可行性。

优势在于成桥索力、所需的主缆面积均小于钢缆索悬索桥,这不仅有利于提高悬索桥的承载效率,还有助于减小锚碇、主塔和基础的规模,节省造价;几乎不受温度荷载的影响。

不足之处在于结构的刚度较小。活载作用下的主梁挠度、桥塔位移均大于钢缆索悬索桥,刚度下降还会造成较大的塔底弯矩。但通过分析表明,CFRP 缆索悬索桥的刚度仍然满足规范要求,其在静力方面具有可行性。

针对 CFRP 缆索悬索桥结构刚度较小的缺点,对其刚度性能进行了参数分析,得到了以下结论和建议。

1)采用单跨布置方式可以获得更高的结构刚度。

2)当矢跨比大于 1/15 时,适量降低矢跨比可以减小主梁最大竖向挠度;而当矢跨比小于 1/15 时,降低矢跨比反而会增大主梁最大竖向挠度。

3)取用较小的边中跨比可以提高结构竖向刚

度,但对侧向刚度没有帮助。

4)增大主梁竖向抗弯惯矩并不能提高结构的整体竖向刚度;增加主梁横向抗弯惯矩则可以提高结构的整体侧向刚度,有效减小静风位移。

5)当桥塔在纵向采用独柱式时,增加桥塔抗推刚度不能有效改善结构刚度,但是若主塔采用抗推刚度很大的 A 型桥塔,则能够有效增强结构刚度。

6)中央扣对整体结构刚度没有影响。

探讨了 CFRP 缆索悬索桥的静力性能,事实上其抗风性能也显得尤为重要。笔者已经对 CFRP 缆索悬索桥的静风、颤振稳定性能及其改善措施进行了研究,关于这方面的成果将在后续文章中报道。

### 参考文献:

- [1] Nath K. Bandra-Worli sea-link, Mumbai, India [J]. Concrete Engineering International, 2005, 9(3): 21-22.
- [2] Curran D J. Bridging the strait: implications for Japan and the United States following a peaceful reunification of China and Taiwan [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.
- [3] Cui J, Cheng F. An engineering concept of the Taiwan Strait tunnel [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2004, 22(3): 173-184.
- [4] 唐寰澄. 世纪著名海峡交通工程[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004.
- [5] Brancaloni F, Fiammenghi G. The Messina Strait

- Bridge; a challenge and a dream [M]. London: Talor & Francis, 2009.
- [6] ANON. Bridge across the strait of Messina [J]. *Revista de Obras Publicas*, 2006, 153(3446): 76-77.
- [7] 贾丽君. 大跨度悬索桥体系及其性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [8] Ge Y J, Xiang H F. Recent development of bridge aerodynamics in China [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 736-768.
- [9] Zhang X J. Wind-resistant performance of cable-supported bridges using carbon fiber reinforced polymer cables [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2008, 36(5): 572-577.
- [10] Zhang X J, Ying D L. Aerodynamic stability of cable-supported bridges using CFRP cables [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 8(5): 693-698.
- [11] 张新军, 应东磊. 应用 CFRP 索的缆索承重桥梁抗风稳定性研究[J]. *公路*, 2007(7): 38-42.  
ZHANG Xinjun, YING Donglei. A study on wind stability of cable-supported bridges using CFRP cables [J]. *Highway*, 2007(7): 38-42.
- [12] 张新军, 应东磊. 应用碳纤维索的大跨度悬索桥抗风稳定性研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(12): 80-82.  
ZHANG Xinjun, YING Donglei. Wind stability of long-span suspension bridges using carbon fiber reinforced polymer cables [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(12): 80-82.
- [13] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [14] Jimsing N J. Cable supported bridges concept & design [M]. England: John Wiley & Sons, 1997.
- [15] 李扬, 肖汝诚. 悬索桥主塔纵向受力的估算方法[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2009, 26(4): 389-393.  
LI Yang, XIAO Rucheng. Simplified analytical method for longitudinal mechanical properties of suspension bridge towers [J]. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2009, 26(4): 389-393.
- [16] 王浩, 李爱群, 杨玉冬, 等. 中央扣对大跨悬索桥动力特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(6): 49-53.  
WANG Hao, LI Aiqun, YANG Yudong, et al. Influence of central buckle on dynamic behavior of long-span suspension bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(6): 49-53.

(编辑 陈移峰)

## (上接第 25 页)

- [11] Wang B S, Xiong S M, Liu Y B. Tensile fracture of as-cast and hot rolled Mg-Zn-Y alloy with long-period stacking phase [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(sup2): 488-492.
- [12] Itoi T, Seimiya T, Kawamura Y, et al. Long period stacking structures observed in Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51: 107-111.
- [13] 李理, 张新明, 邓运来, 等. 第二相在 Mg-Gd-Y-Zr 合金挤压棒超塑性变形中的作用[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 11-16.  
LI Li, ZHANG Xinming, DENG Yunlai, et al. Effect of second phase on superplastic deformation of extruded rod of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 11-16.
- [14] 王其龙, 吴国华, 郑韞, 等. Mg-Gd-Y 系合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2009, 23(6): 104-108.  
WANG Qilong, WU Guohou, ZHENG Yun, et al. Research development of Mg-Gd-Y alloys [J]. *Materials Review*, 2009, 23(6): 104-108.
- [15] Wang J, Yang Y S, Tong W H. Effect of purification treatment on corrosion resistance of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(4): 949-954.
- [16] LI Jilin, CHEN Rongshi, KE Wei. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 761-766.

(编辑 陈移峰)