

文章编号:1671-6833(2005)01-0038-04

斜拉索顺桥向风阻系数的试验研究

林志兴, 杨立波, 李文勃

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:采用风洞试验的方法研究了 4 种不同表面的斜拉索(包括 1 种光索、2 种螺旋线索和 1 种凹坑索)在不同倾角下的顺桥向阻力系数. 试验结果表明:凹坑索和 2mm 螺旋线索的阻力系数相差不大, 均可应用于斜拉桥的设计当中. 根据试验结果给出了形式上比较简单的用于计算斜拉索不同倾角下阻力系数值的拟合公式. 分析表明, 此拟合公式和试验结果拟合较好且偏于安全.

关键词:桥梁工程; 斜拉桥; 拉索; 阻力系数; 风洞试验

中图分类号: TU 312

文献标识码: A

0 引言

大跨度斜拉桥倾向于采用近流线型的扁平箱梁和密索体系. 斜拉桥跨度越大, 风荷载的影响也越大. 斜拉桥的跨度对作用于斜拉索和主梁上的风荷载的比例也有很大的影响. 例如: 跨度 1 000 m 的斜拉桥中, 作用于斜拉索上的风荷载与主梁上的风荷载有可能相同, 甚至斜拉索上的风荷载有更大的倾向^[1]. 因此, 准确确定作用于斜拉索上的风荷载具有与主梁上的风荷载确定同样重要的意义. 以往, 对斜拉索上的风荷载重视不够, 缺乏精确的研究, 往往以较粗的估计应用于结构的设计中. 《公路桥梁抗风设计指南》规定, 当缆索与缆索的中心间距为直径 4 倍以上时, 每根缆索的风荷载要独立考虑, 其阻力系数为 0.7; 当主缆中心间距不到直径的 4 倍时, 不对两根缆索分别加载, 而按阻力系数为 1.0 的一根缆索来计算^[2]. 这已不能满足超大跨度斜拉桥的设计要求. 为此, 对作用于斜拉索上的风荷载进行研究很有必要. 本文采用风洞试验的方法研究了 4 种不同表面措施拉索, 包括 1 种光索、3 种抗风雨振气动措施拉索(2 种螺旋线拉索、1 种凹坑拉索)在 4 种不同倾角下, 包括 20°, 40°, 60°和 90°下的阻力系数. 文献[3]表明, 螺旋线索和凹坑索均能有效抑制拉索的风雨激振^[3].

阻力系数 C_d 的计算公式如下^[4]:

$$C_d(\alpha) = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} \quad (1)$$

式中: F_x 为天平测得的 x 方向上(来流方向)的气动力; ρ 和 U 分别为空气密度和来流速度; L 和 D 分别为模型的长度和直径. 通过试验确定了拉索的阻力系数, 则由式(1)通过简单变换可以计算出作用于拉索上的静风荷载.

1 试验装置

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-2 风洞中进行. 该风洞试验段长 15 m、宽 3 m、高 2.5 m. 空风洞风速 1.0~68 m/s 连续可调, 紊流度 $\epsilon < 0.8\%$. 风洞距进口 2.15 m 和 10.5 m 处分别设有可变换转角的转盘, 该试验在第一转盘处进行. 测力系统由 1 台浮框式六分量应变天平、1 台框式六分量应变天平、应变放大器 A/D 转换器和微机组成. 其中浮框式天平阻力方向的最大量程为 100 kg, 框式天平阻力方向最大量程为 50 kg. 图 1(a) 给出了试验装置安装示意, 图 1(b) 为风洞中的试验装置照片. 本试验采用了拉索两端测力的外式天平测力方案, 下端天平在风洞底板下方, 上端天平置于风洞内. 为避免风场干扰, 上端天平及其支撑机构用挡风罩与风场隔离. 为了保证测量的精度, 被测拉索的两端设置了形状相同的补偿模型.

拉索模型由薄壁钢管外挤 PE 形成, 包括 1 种

收稿日期: 2004-10-11; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 上海市科委科技发展基金资助项目(036511002)

作者简介: 林志兴(1940-), 男, 辽宁省大连市人, 同济大学研究员, 博士生导师, 主要从事桥梁抗风方面的研究.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

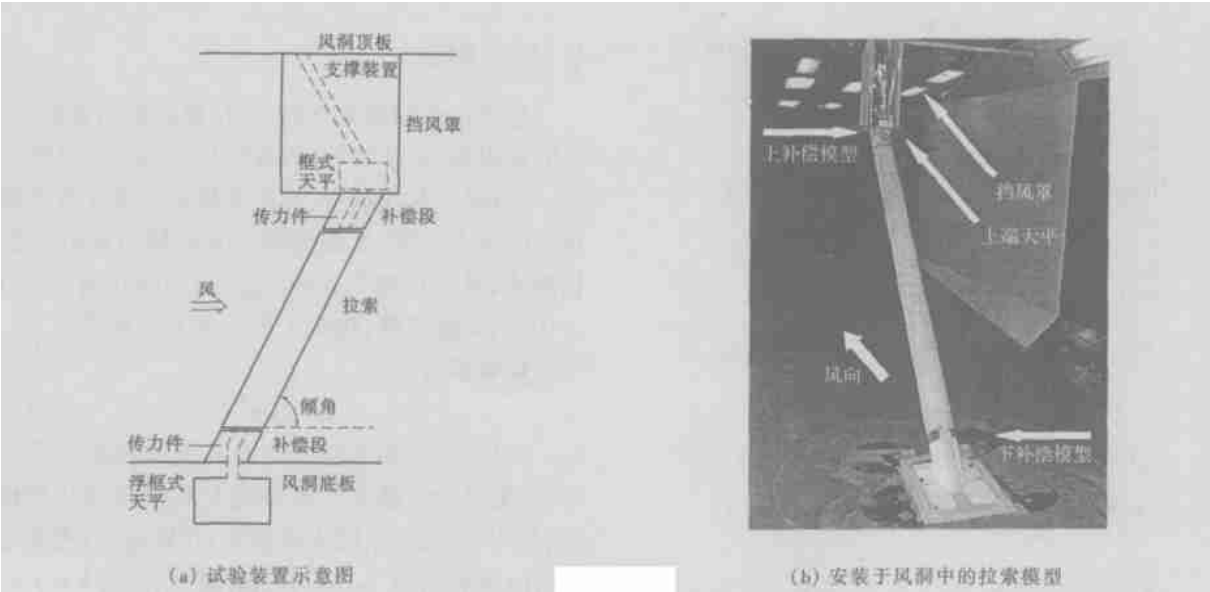


图1 试验装置及拉索模型

Fig. 1 Experiment setup and cable model

光面、1种压痕凹坑、2种螺旋线索,其中螺旋线索采用双螺旋线,顺时针绕向,螺距为8倍拉索直径,螺旋线直径分别为2 mm和4 mm.压痕凹坑索为在拉索表面按照一定的排列方式布置压痕凹坑,本试验中压痕凹坑的覆盖率为5%左右.由于圆形截面阻力系数具有明显的雷诺数 Re 效应^[3],为了消除这一影响,拉索模型的直径为139 mm,与实索直径相当.模型长度根据不同的倾角有所不同,随着倾角的增加分别为3.2 m、2.2 m、1.7 m和2.2 m.

2 试验内容

共进行了4种拉索模型,(1种光索、2种螺旋线索、1种凹坑索)在倾角20°,40°,60°和90°下的风洞测力试验.风速范围15~55 m/s,间隔5 m/s.试验工况如表1所示.

表1 试验工况表

Tab. 1 Test program

编号	模型类型	直径 D/mm	长度 L/mm	倾角 $\alpha/(\text{^\circ})$	风向倾角 $\beta/(\text{^\circ})$
1	光索	139	3 200	20	0
2	光索	139	2 200	40	0
3	光索	139	1 700	60	0
4	光索	139	2 200	90	0
5	螺旋线索1	139	3 200	20	0
6	螺旋线索1	139	2 200	40	0
7	螺旋线索1	139	1 700	60	0
8	螺旋线索1	139	2 200	90	0
9	螺旋线索2	139	3 200	20	0
10	螺旋线索2	139	2 200	40	0
11	螺旋线索2	139	1 700	60	0
12	螺旋线索2	139	2 200	90	0

续表 1

编号	模型类型	直径 D/mm	长度 L/mm	倾角 $\alpha/(\text{^\circ})$	风向倾角 $\beta/(\text{^\circ})$
13	凹坑索	139	3 200	20	0
14	凹坑索	139	2 200	40	0
15	凹坑索	139	1 700	60	0
16	凹坑索	139	2 200	90	0

说明:试验5~8的螺旋线直径为2 mm;试验9~12的螺旋线直径为4 mm.

3 试验结果

试验结果见图2~图5.由以上结果可以看出,直立拉索模型,即倾角90°拉索模型的阻力系数具有明显的雷诺数效应.但加了表面措施的拉索模型与光面拉索模型相比,雷诺数效应已经不那么显著.而且随着模型倾角的降低,阻力系数随雷诺数的变化也逐渐趋于平缓.当雷诺数大于 4.6×10^5 时,阻力系数随雷诺数的变化已经很小.

同时可以看出,在多数情况下,光面拉索模型的阻力系数比加了表面措施的拉索模型阻力系数要小.螺旋线拉索模型,在相同的条件下,即相同的螺距和倾角下,螺旋线直径越大,阻力系数也越大.凹坑拉索模型的阻力系数在多数情况下比螺旋线索模型略小.

以上结果为来流指向拉索上升方向.同时还进行了来流指向拉索下降方向的试验.试验结果表明,两种情况下拉索的阻力系数相差很小.限于篇幅不再给出来流指向拉索下降方向的试验结果.

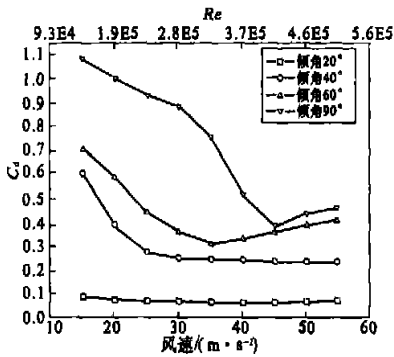


图 2 光索的阻力系数

Fig. 2 Drag coefficients of smooth cable

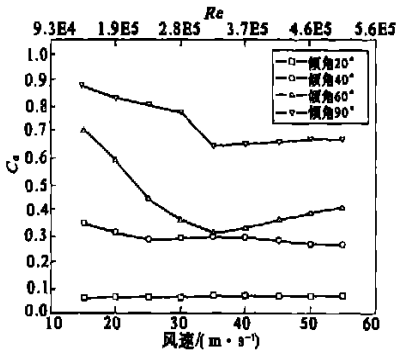


图 3 螺旋线索 1 的阻力系数

Fig. 3 Drag coefficients of helical fillet cable 1

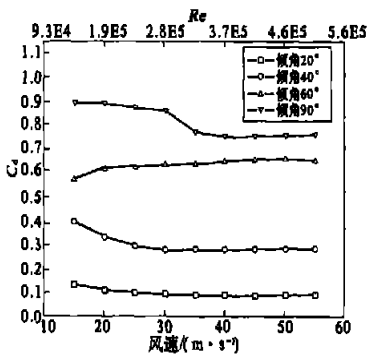


图 4 螺旋线索 2 的阻力系数

Fig. 4 Drag coefficients of helical fillet cable 2

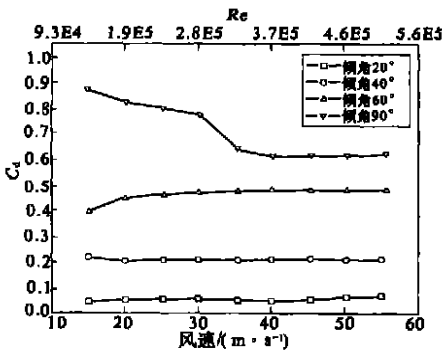


图 5 凹坑索的阻力系数

Fig. 5 Drag coefficients of dimpled cable

4 公式拟合

假设拉索倾角为 0° 时,斜拉索的阻力系数 $C_d \approx 0$,根据倾角为 $20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$, 以及 90° 的试验结果, 可以进行曲线拟合, 从而推算斜拉索在各种倾角下的阻力系数. 考虑到阻力系数随雷诺数的变化规律, 选取风速为 55 m/s , 相应的雷诺数为 5.1×10^5 的试验数据, 这在工程应用上更有意义.

试取拟合公式:

$$C_d = A \sin^2 \alpha \tag{2}$$

式 (2) 与采用多项式拟合及其他拟合公式相比, 能更好地反映阻力系数随拉索倾角变化的规律. 其中, A 为拉索的表面参数, 其取值为: 光索 $A = 0.6$; 螺旋线索 1, $A = 0.7$; 螺旋线索 2, $A = 0.8$; 凹坑索, $A = 0.65$. α 为斜拉索倾角.

由所取的拟合公式 (2), 可以得到如图 6~图 9 所示的结果. 可以看出, 除了光索由于雷诺数效应在超临界区偏大外, 对于螺旋线索和凹坑索均拟合很好. 所给出拟合结果是偏于安全的. 所给拟合结果的值在拉索倾角小于 60° 时与《公路桥梁抗风设计指南》中规定的阻力系数 $C_d^{[3]}$ 相比要小很多. 而大跨度斜拉桥小倾角拉索长度大, 所占的

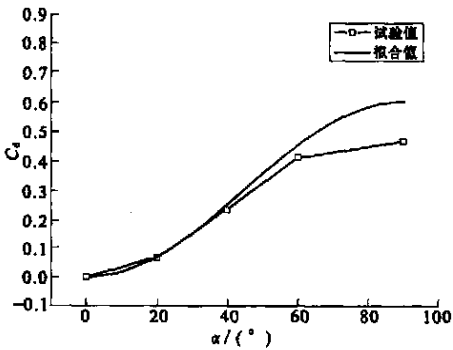


图 6 光索阻力系数公式拟合

Fig. 6 Fitted for mla for smooth cable

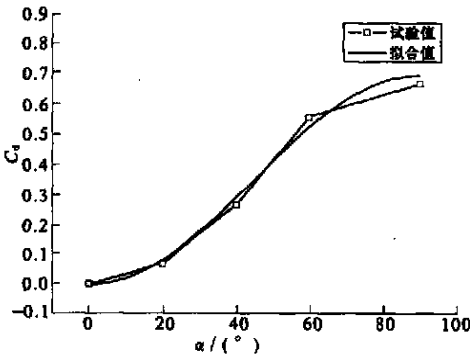


图 7 2 mm 螺旋线索阻力系数公式拟合

Fig. 7 Fitted for mla for 2 mm helical fillet cable

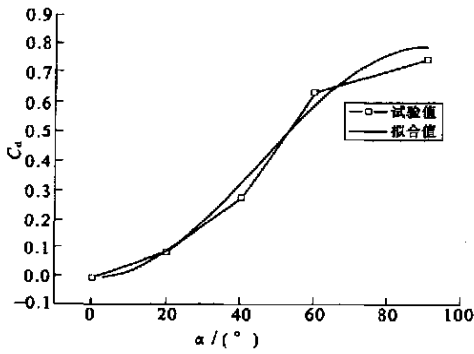


图 8 4mm 螺旋线索阻力系数公式拟合

Fig. 8 Fitted formula for 4mm helical fillet cable

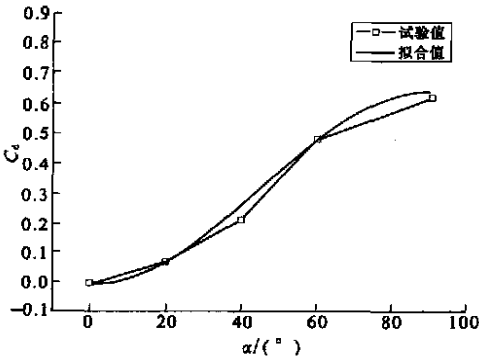


图 9 凹坑索阻力系数公式拟合

Fig. 9 Fitted formula for dimpled cable

数量多,采用本文试验结果计算出的拉索风荷载要比采用《公路桥梁抗风设计指南》中所规定阻力系数计算出的拉索风荷载减小 50%左右。

5 结论

(1) 阻力系数随斜拉索倾角的变化明显,随

着倾角的增大,阻力系数增大,具有单调性。

(2) 拉索阻力系数具有明显的雷诺数效应,但加了抗风雨振表面措施的拉索阻力系数的雷诺数效应已经没有光面拉索那么显著,而且随着倾角的变小,阻力系数随雷诺数的变化也趋于缓和。

(3) 在螺距相同的情况下,螺旋线索的阻力系数随着螺旋线直径的增加而增加。

(4) 凹坑拉索的阻力系数在多数情况下比螺旋线拉索的阻力系数小,与 2 mm 螺旋线拉索的阻力系数相差不大。

(5) 根据试验结果给出了斜拉索阻力系数拟合公式 $C_d = A \sin^2 \alpha$, 其中 A 是斜拉索表面参数。按照雷诺数相等的要求,可以应用于实际工程的设计当中。

(6) 与《公路桥梁抗风设计指南》中所规定的阻力系数 $C_d^{[3]}$ 相比,采用本文试验结果将大大减小作用于拉索上的风荷载计算值。

参考文献:

[1] 陈开利. 阻力小、气动性能稳定的斜拉索的实验研究[J]. 国外桥梁, 1996, (3): 58~61.
[2] 项海帆, 林志兴, 鲍卫刚, 等. 公路桥梁抗风设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996. 22~23.
[3] 李文勃. 斜拉桥拉索风雨激振及气动减振措施研究[D]. 上海: 同济大学桥梁工程系, 2004. 55~57.
[4] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996. 441~412.
[5] 李加武, 林志兴, 项海帆. 极端桥梁断面雷诺数效应研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 23(2): 22~25.

Experimental Study on Drag Coefficients of Stay-cables Corresponding to Wind Direction along the Bridge Central Line

LIN Zhi-xing, YANG Li-bo, LI Wen-bo

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the increase of the span of cable-stayed bridges, flat box girders that are approximately streamline and thick cable systems are inclined to be used. The proportion of wind load that acts on cables is increasing, even exceeds that acting on main beams. So it is necessary to investigate into the drag coefficients of cables through the method of wind tunnel test. In order to provide the wind loads acting on cables for cable-stayed bridge design, this paper investigates into drag coefficients of stay-cables with four different surface configurations under different inclinations corresponding to wind direction along the bridge central line respectively through the method of wind tunnel tests. According to the test results, simple fitting formulas are given which can be used to calculate drag coefficients under different inclinations.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; stay cable; drag coefficient; wind tunnel test