

斜拉桥的拉索纵桥向风荷载计算方法研究

裴岷山, 张喜刚, 朱 斌, 侯 斌, 刘昌鹏

(中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

[摘要] 介绍了苏通大桥在设计过程中专门对斜拉索进行的测力试验情况, 并与国外相关研究成果进行了对比, 提出了斜拉索纵桥向风荷载阻力系数计算公式。该研究填补了我国桥梁抗风设计规范的空白, 已被纳入《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004), 具有很高的实际指导意义。

[关键词] 苏通大桥斜拉桥; 斜拉索; 纵桥向; 风荷载试验

[中图分类号] U448.27 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0026-05

1 前言

改革开放以来, 随着我国国民经济的持续快速发展, 桥梁建设有了突飞猛进的发展, 更长、更高、更轻、更柔已经成为当代大跨桥梁的趋势。随着桥梁跨径的增大, 某些常规跨径桥梁反应不明显的因素将会变得更加突出, 设计控制因素也将更加复杂多样。设计实践表明, 风荷载越来越成为超大跨径斜拉桥结构设计的控制因素, 其中拉索所受风荷载占了较大的比例, 已经超过了主梁。由于缺乏理论研究和试验验证, 过去斜拉索纵桥向风荷载计算在我国设计规范中没有明确规定, 设计过程中也都采取了过分保守的简单计算, 导致结构设计的经济合理性较差。实际上, 斜拉索纵桥向风荷载要比横桥向小很多, 与斜拉索的倾角有关。因此, 寻求斜拉桥拉索合理可靠的纵桥向风荷载计算方法对于保证大跨径桥梁设计的安全性、先进性和经济性, 提高我国桥梁抗风设计水平具有重要的意义, 同时也能为我国《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004)^[1]的编制提供科学的依据。

2 问题的提出

大跨度斜拉桥由于拉索数量多、长度大, 斜拉索

产生的风荷载所占比例也越来越大, 已经超过了主梁。以世界上最大跨径的斜拉桥——苏通长江公路大桥为例, 其最长斜拉索达 580 m, 全桥 272 根斜拉索, 在横桥向风荷载作用下, 斜拉索所产生的风荷载对于主梁位移及内力的贡献占整个风荷载的 60%~70%, 梁约占 30%, 塔约占 5%~10%。因此, 在大跨径斜拉桥设计中应该高度重视斜拉索上的风荷载, 其计算合理与否直接影响到结构的安全性与经济性。

在苏通大桥设计过程中, 就斜拉索风荷载计算对各国抗风规范进行了对比研究。就横桥向风荷载来说, 欧洲、日本规范与我国《公路桥梁抗风设计指南》^[2]的规定是一致的。而在纵桥向风荷载作用下, 斜拉索风荷载的计算与我国常规计算有较大的差异。由于我国《公路桥梁抗风设计指南》对此没有明确的规定, 在以往桥梁设计中, 纵桥向斜拉索的阻力系数与横桥向取相同的数值, 且加载长度按斜拉索垂直于来流方向上的投影长度计算, 即按下式^[2]简单保守计算:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_d^2 C_H D (L \sin \alpha) \quad (1)$$

取 $C_D = C_H \sin \alpha$

$$\text{则: } F_D = \frac{1}{2} \rho V_d^2 C_D DL \quad (2)$$

[收稿日期] 2008-11-15

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAG04B01)

[作者简介] 裴岷山(1971-), 男, 山东沾化县人, 教授级高级工程师, 主要从事大跨径桥梁的设计与研究工作; E-mail: peims@126.com

式(1)中, F_D 为纵桥向风荷载; C_D 为纵桥向斜拉索阻力系数; α 为斜拉索纵桥向倾角; ρ 为空气密度; C_H 为横桥向斜拉索阻力系数; D 为斜拉索直径; L 为斜拉索长度; V_d 为静阵风风速。

按以往中等跨径斜拉桥设计的常规计算方法, 我国纵桥向风荷载斜拉索阻力系数为:

$$C_D = C_H \sin \alpha \quad (3)$$

欧洲抗风规范规定:

$$C_D = 1.2 \sin^3 \alpha \quad (4)$$

日本本四公团《抗风设计标准·同解说》^[3] 规定:

$$C_D = 0.7 \sin^3 \alpha \quad (5)$$

从式(3), (4) 和 (5) 可以看出, 我国过去简单的计算方法与欧洲和日本有较大的差异, 而欧洲和日本的计算公式相近, $C_D = C_{D0} \sin^3 \alpha$, 只是系数 C_{D0} 的取值不同。对于中小跨径的斜拉桥来说, 计算方法的不同所带来的荷载差异可能不太明显; 但对于苏通大桥这样千米级斜拉桥却不可忽视, 因为这种计算的差异会直接影响到工程规模的变化。

表 1 列出了苏通大桥在漂浮体系下, 斜拉索纵桥向风荷载不同计算方法的结构响应比较^[4]。

表 1 苏通大桥风荷载结构响应比较

Table 1 Comparison of structure reaction under wind load of Sutong Bridge

项目	索塔底弯矩/(MN·m)	主梁纵桥向位移/m
公式(3)	5 361	1.350
公式(4)	4 378	1.054

从表 1 可以看出, 不同的计算方法在塔底产生的弯矩和梁端位移差异较大, 直接控制了基础工程的规模、伸缩缝选型和结构体系的确定。为了保证苏通大桥设计的科学合理性, 并为当时正在编制的《公路桥梁抗风设计规范》^[1] 提供科学依据, 苏通大桥建设指挥部、中交公路规划设计院有限公司和同济大学联合组织实施了斜拉索测力试验, 专题研究斜拉索纵桥向风荷载计算方法。

3 国外抗风规范相关规定分析

由以上分析可知, 欧洲和日本对纵桥向风荷载作用下倾斜拉索的阻力系数均采用了 $C_D = C_{D0} \sin^3 \alpha$ 的计算方法。该计算方法来源于斜拉索风荷载响应的理论推导, 计算模型如图 1 所示。

在水平纵向风作用下, 作用于斜拉索(拉索直径为 D) 上的垂直风荷载 F_N 可表示为如下形式:

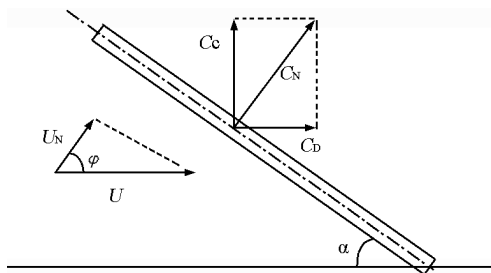


图 1 纵桥向风荷载斜拉索阻力系数计算模型

Fig. 1 Calculation model of longitudinal wind load drag force factor

$$F_N = \frac{1}{2} \rho U_N^2 C_{D0} DL \quad (6)$$

式(6)中, F_N 为垂直于斜拉索轴向的风荷载; C_{D0} 为斜拉索垂直于来流风时的阻力系数; U_N 为水平纵向风速垂直拉索方向的投影。

由 $U_N = U \cos \varphi$, 则式(6)可表示为:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho U^2 \cos^2 \varphi C_{D0} DL \quad (7)$$

采用无量纲形式表达, 有

$$C_N = \frac{F_N}{\frac{1}{2} \rho U^2 DL} = C_{D0} \cos^2 \varphi = C_{D0} \sin^2 \alpha \quad (8)$$

假定作用于斜拉索轴向的风荷载可以忽略, 于是作用于斜拉索上的水平向风荷载对应的阻力系数可以近似表示为:

$$C_D \approx C_N \cos \varphi = C_{D0} \sin^3 \alpha \quad (9)$$

竖向风荷载对应的阻力系数为

$$C_C \approx C_N \sin \varphi = C_{D0} \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (10)$$

欧洲抗风规范中拉索在纵桥向风作用下的阻力系数 $C_D = C_{D0} \sin^3 \alpha$, 其中, $C_{D0} = 1.2$ 来源于风工程物理推导结果, 并考虑了一定安全度因素取包络控制值而确定的。

日本本四公团《抗风设计标准·同解说》中拉索在纵桥向风作用下的阻力系数 $C_D = C_{D0} \sin^3 \alpha$, 其中, $C_{D0} = 0.7$ 主要基于日本普遍使用表面凹坑拉索(其阻力系数要小于表面螺旋线拉索), 且控制设计的是设计风速而非与活载组合的低风速。

因此, 从计算公式分析, 欧洲规范比日本规范要偏于保守一些。

4 苏通大桥横桥向斜拉索测力试验研究^[5]

4.1 试验方法

选择 $\phi 139$ mm、3 种表面(一种光面、一种压痕凹坑、9 种不同螺距及螺旋线直径)拉索, 在 TJ-2

风洞中采用测力天平测量均匀流场下直立拉索的风阻系数。比较试验中各种表面情况的拉索的阻力系数,给出计算苏通大桥横桥向风荷载时拉索阻力系数的控制值。为了消除雷诺数效应的影响,试验中选取直径比例为1:1的拉索模型,试验风速从15 m/s到55 m/s。

4.2 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 号边界层风洞中进行,拉索为直立安装,并采用上下两个天平同时测量的试验方案。除下端采用浮框式 6 分量测力天平外,在风洞顶壁上安装了一个 5 分量盒式天平,阻力方向测力范围为 0~20 kg,测量误差 <20 g。为了减小由于端头三维流动带来的误差,在模型上方装有和拉索相同直径的补偿模型。试验装置如图 2 所示。



图 2 横桥向风荷载试验装置

Fig. 2 Experiment instrument of transverse wind load

4.3 试验结论

不同表面斜拉索在横桥向风作用下的测力风洞试验结果如图 3 所示。

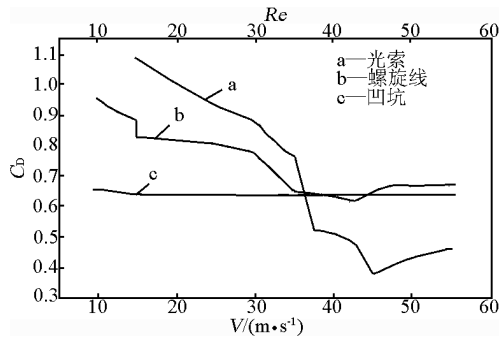


图 3 不同表面斜拉索横桥向风下的阻力系数

Fig. 3 Drag force factors for different cable surfaces

由图 3 可以得出如下结论:

- 1) 设计风速下,光索阻力系数最小,而低风速下,光索阻力系数较大;
- 2) 螺旋线拉索的阻力系数略大于表面凹坑拉索的阻力系数;

3) 螺旋线拉索的螺距越大其阻力系数越小,直径越大其阻力系数越大;

4) 桥面风速为 25 m/s(即与活载组合)时,斜拉索风阻系数可按 1.0 控制设计;

5) 在设计基准风速时,斜拉索风阻系数可按 0.8 控制设计。

上述研究结论已被纳入《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004)第 4.4.5 条^[1]。

5 苏通大桥纵桥向斜拉索测力试验研究^[5]

由于不同方向风作用下斜拉索的阻力系数具有关联性,同时也为苏通大桥设计提供不同风向拉索阻力系数的控制值,同济大学进行了斜拉索纵桥向测力风洞试验。

5.1 试验方法

选择 $\phi 139$ mm 3 种表面(一种光面、一种压痕凹坑、两种不同螺旋线直径)拉索,在 TJ-2 风洞中采用测力天平测量均匀流场下、斜置拉索的风阻系数。试验中模拟斜拉索的倾斜角度,模拟了来流指向拉索上升方向和来流指向拉索下降方向(见图 4)两种情况。比较试验中所有拉索在每种倾斜角度下的阻力系数,选取最大的风阻系数作为该倾角的试验控制值,最后根据各个倾角下的试验控制值拟合出拉索的风阻系数随倾角变化的函数关系式。为了消除雷诺数效应的影响,试验中选取直径比例为 1:1 的拉索模型,试验风速从 15 m/s 到 55 m/s。来流指向拉索上升方向,倾角为负;来流指向拉索下降方向,倾角为正。

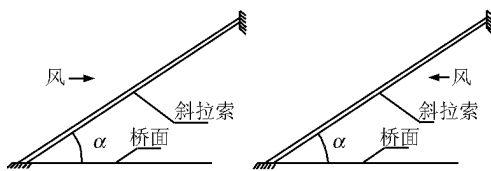


图 4 纵桥向风作用在斜拉索上方向示意图

Fig. 4 Sketch of longitudinal wind load act on the cables

5.2 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 号边界层风洞中第一转盘处进行。试验中采用斜置拉索、上下两个天平同时测量的试验方案。拉索下端采用浮框式 6 分量测力天平,测力范围 0~20 kg,测量误差 <20 g;拉索上端采用 6 分量盒式天平,阻力方向测力范围为 0~50 kg,测量误差 <60 g;上下两个天平同时测量拉索上作用的风荷

载。模型长度根据倾角的变化分别为 3.2 m, 2.2 m 和 1.7 m, 为了减小由于端头三维流动带来的误差, 在模型两端装有和拉索相同直径的补偿模型; 同时在拉索模型和风洞顶板之间安装了挡风罩, 以消除风荷载对支架和上面天平所产生的对试验的影响, 试验装置如图 5 所示。

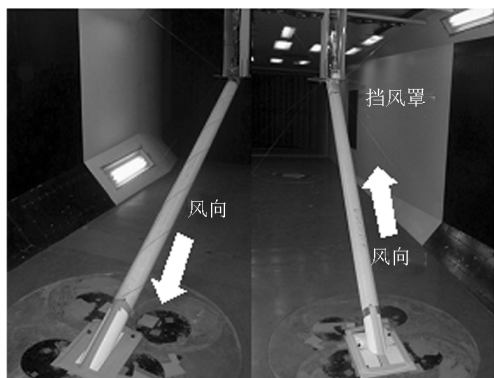


图 5 纵桥向风荷载试验装置

Fig. 5 Experiment instrument of longitudinal wind load

5.3 试验结论

不同表面、不同倾角斜拉索在设计风速纵桥向风作用下的测力风洞试验结果如图 6 所示, 为了验证结构的可靠性, 同时进行了计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法模拟, 结果表明两者结果非常吻合。

- 1) 多数情况下, 气动措施拉索的阻力系数大于光索的阻力系数;
- 2) 阻力系数随拉索倾角 (绝对值) 的增大而增大, 具有单调性;
- 3) 倾角越小, 阻力系数随 Re 数的变化越趋于平缓;
- 4) 螺旋线拉索的阻力系数略大于表面凹坑拉索的阻力系数;
- 5) 对于相同倾角、相同风速、相同螺距的不同线径螺旋线拉索, 阻力系数随着线径的增加而增大。

5.4 试验数据拟合

假设 $\alpha = 0^\circ$ 时, $C_D \approx 0$, 根据 $\alpha = \pm 20^\circ, \pm 40^\circ, \pm 60^\circ$, 以及 90° 的试验结果可以进行阻力系数随倾角变化的曲线拟合, 推导 $C_D \propto \alpha$ 的函数关系式, 所确定的拟合公式为:

$$C_D = A \sin^2 \alpha \quad (11)$$

其中, 桥面风速为 25 m/s (即与活载组合) 时, $A = 1.0$; 设计风速时, $A = 0.8$ 。

将设计风速下各种拉索在不同倾角下的阻力系数和拟合曲线绘于图 6。

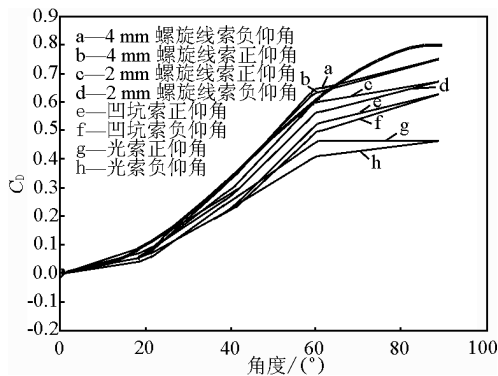


图 6 不同倾角不同表面拉索纵桥向风下的阻力系数

Fig. 6 Drag force coefficient for different obliquity and surface of cables

对横桥向风荷载, $\alpha = 90^\circ$, $C_D = A$ 。因此, 公式 (11) 也可作为横桥向风和纵桥向风拉索阻力系数计算的统一公式。

上述研究结论已被纳入《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01-2004) 第 4.4.6 条。

6 与欧洲抗风规范相关规定的比较

在纵桥向风作用下, 不同倾角斜拉索按欧洲规范和苏通大桥研究成果设计风速时的阻力系数比较见图 7。

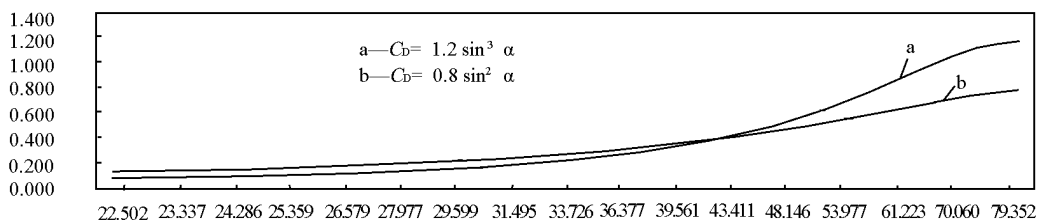


图 7 欧洲规范与苏通大桥研究成果拉索纵桥向风的阻力系数比较

Fig. 7 Comparison of longitudinal wind drag force coefficient from Euro-code and Sutong Bridge researches

根据两种不同阻力系数计算所得的单个索面上总风力(以苏通大桥主跨 J1 ~ J34 单个索面为例),苏通大桥研究成果相对于欧洲设计规范要增加 5%;从塔、梁和索共同产生的全桥纵桥向风荷载总和比较,苏通大桥研究成果要高出 8.5%^[6]。

从上述比较结果可知,苏通大桥研究成果比欧洲规范略显保守,但考虑试验和理论分析的不确定因素,两者之间的差异是可以接受的。

7 结语

1) 大跨径斜拉桥拉索风荷载计算的合理与否直接影响到桥梁结构设计的科学合理性,对其进行专题研究是非常必要的;

2) 苏通大桥所开展的斜拉索测力试验研究成果,填补了我国桥梁抗风设计规范的空白,已被纳入《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60 - 01 - 2004),具有很高的实际指导意义,是我国桥梁抗风设计的一个创新型成果;

3) 苏通大桥的研究成果与国外相关规范比较,差异不大,且有一定的安全度富裕;

4) 苏通大桥所提出的纵桥向风拉索阻力系数计算公式也适用于横桥向风,计算公式可以统一,适用性强。

参考文献

- [1] JTG/T D60 - 01 - 2004. 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004
- [2] 项海帆,林志学,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
- [3] Nippon Honshu - Shikoku Consortium. Wind - resistant Design Criteria[S]. Tokyo: Maruyoshi press Co., Ltd., 1994
- [4] 苏通大桥设计项目组. 苏通大桥初步设计文件[R]. 南通:苏通大桥设计项目组,2002
- [5] 同济大学. 苏通大桥斜拉索测力试验报告[R]. 上海:同济大学,2004
- [6] COWI 公司. 苏通大桥 CARDC 风雨振和阻力系数试验风洞试验说明性报告[R]. 丹麦:COWI 公司, 2004

Study on longitudinal wind load calculation method of cables for cable-stayed bridge

Pei Minshan, Zhang Xigang, Zhu Bin, Hou Bin, Liu Changpeng
(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

[Abstract] The cable force experiment was carried out during the design of Sutong Bridge. By comparing with the international research results, the calculation formula of longitudinal wind drag coefficient for cables was advanced to fill the blank of bridge wind resistant code of China, and this formula has already been adopted in the *Highway Bridge Wind Resistant Design Code* (JTG/T D60-01-2004) with great significance for bridge engineering.

[Key words] Sutong cable-stayed bridge; stayed cable; longitudinal; wind tunnel experiments