

文章编号:1671-6833(2010)02-0014-04

索对斜拉拱桥横向静风稳定性的影响

钱雪松, 胡兆同, 李加武

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:应用有限元软件 ANSYS 对斜拉拱桥在静风荷载作用下的面外稳定问题进行研究, 考虑不同索预张力、索塔高度、索距及拉索布置位置等参数下索对斜拉拱桥横向静风稳定性的影响. 结果表明:拉索可以有效控制结构的面外失稳形式, 斜拉拱桥具有较高的横向抗风稳定性;增大索预张力、增高索塔及减小索距都能改善结构横向静风稳定性, 且塔高影响最显著, 增高索塔甚至能使横向静风稳定性提高近一倍;拉索布置位置对横向静风稳定性有明显影响, 且索面中心线宜位于拱肋四分点处.

关键词:斜拉拱桥; 面外失稳; 静风荷载; 失稳形式

中图分类号: U448.29

文献标识码: A

0 引言

斜拉拱桥是一种新型的组体系桥, 它由斜拉桥和拱桥组合而成, 是一种以拱结构受力为主, 辅以斜拉索受力的组合桥, 其结构示意图见图 1.



图 1 斜拉拱桥结构示意图

Fig. 1 Structural figure of cable-stayed arch bridge

斜拉拱桥中, 柔性索与刚性拱的结合使结构体系的力学性能发生了很大的变化, 斜拉索的存在使得斜拉拱桥的面内基频与面外基频的比值较同类型拱桥的比值要大很多^[1], 这说明相对于普通拱桥而言, 斜拉拱桥的面外稳定问题较面内显得更为突出. 关于拱桥面外稳定问题, 国内外已进行了大量研究^[2-5], 但对斜拉拱桥面外稳定分析研究较少. 对于面外稳定问题, 由于涉及到面外荷载如静风荷载, 比面内稳定问题复杂得多, 目前对此类问题的研究极为欠缺, 亟待深入探讨. 另外, 索的单拉性在结构体系中发挥着特殊的作用, 通过与拱共同工作, 会改变拱的变形及受力特点, 对拱的稳定性、屈曲前后的变形都有一定的影响. 笔者利用有限元软件 ANSYS 对斜拉拱桥在静风荷载作用下的面外稳定问题进行了研究, 并通过改变索预张力、索塔高度、索距及拉索布置位置等结

构参数, 研究了索结构对静风荷载作用下斜拉拱桥横向稳定性的影响.

1 稳定基本理论

根据文献[6], 受一定荷载作用的结构处于稳定的平衡状态, 当荷载达到某一值时, 若增加一微小增量, 则结构的平衡位形发生很大变化, 结构由原平衡状态经过不稳定的平衡状态而达到一个新的稳定的平衡状态, 这一过程就是失稳或屈曲, 相应的荷载称为屈曲荷载或临界荷载.

依据失稳定义, 具有预应力构件的结构屈曲时荷载增加一个微量, 其位移发生较大变化, 因此结构的增量有限元平衡方程为

$$([K_0] + [K_\sigma] + [K_\epsilon]) \{\Delta u_e\} = 0 \quad (1)$$

式中: $[K_0]$ 为单元的弹性刚度矩阵; $[K_\sigma]$ 为单元的初应力刚度矩阵; $[K_\epsilon]$ 为单元的初应变刚度矩阵.

因结构屈曲时上述方程中 $\{\Delta u_e\}$ 必有非零解, 因而 $[K_0] + [K_\sigma] + [K_\epsilon] = 0$. 结构的线性屈曲分析假设屈曲前结构处于初始构形平衡状态, 因此上式中的 $[K_\epsilon] = 0$; 而在小位移情况下, $[K_\sigma]$ 与应力水平成正比, 应力与外荷载也为线性关系.

设 $K_{\sigma ref}^p$ 为参考荷载 P_{ref} 对应的初应力矩阵, λ_{cr} 为屈曲时的荷载参数, $P_{cr} = \lambda_{cr} P_{ref}$, 则屈曲时结构的初应力矩阵可表示为:

收稿日期: 2009-10-06; 修订日期: 2010-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578014)

作者简介: 钱雪松 (1979-), 女, 吉林梨树人, 长安大学博士研究生, 研究方向为桥梁抗风及控制, E-mail: qxs731@126.com.

$$[K_{\sigma}] = \lambda [K_{\sigma ref}^p] \quad (2)$$

因此经典线性稳定理论的控制方程为

$$[K_0] = \lambda_{cr} [K_{\sigma ref}^p] \quad (3)$$

显然,这是一个广义特征值问题,所求得的值 λ_{cr} 即为结构的稳定系数.如果方程左端为 n 阶方阵,那么求解方程可以得到 n 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$,相应地可求出 n 个特征向量.它们分别表示各阶临界荷载的大小及相应的屈曲模式.但在工程问题中,只有最小的稳定系数才有实际意义.

2 计算模型

某单跨下承式斜拉拱桥,主拱采用双肋钢筋混凝土截面无铰平行拱,计算跨径为200 m,矢跨比为1/5,拱轴系数为1.543;桥宽12 m,肋间等间距布置5道“一”字撑;吊杆采用预应力张拉,以使桥面标高跟设计标高一致;斜拉索的布置采用修正的空间扇形,索面与拱肋处于同一平面内,拉索与吊杆锚固于同一节点上,索力的确定原则为同节点的索力与吊杆拉力的合力方向为该节点处的切线方向,从而使得拱肋的弯矩和剪力最小.

采用有限元计算软件 ANSYS 建立斜拉拱桥的有限元分析模型如图2所示.在有限元分析模型中拱肋、横撑、横梁以及主梁采用空间梁单元 BEAM44 模拟,以释放梁端约束自由度的形式模拟主梁两端的简支或铰支状态;拉索、吊杆模拟为只承受拉力的杆元(ANSYS 中 LINK10 单元),预张力以赋予杆元初应变的方式实现,并采用 Ernst 等效模量考虑斜拉索垂度效应的影响.另外,假定索塔的抗弯刚度无限大,有限元模型中没有模拟索塔,直接将索塔上的拉索端部固结.

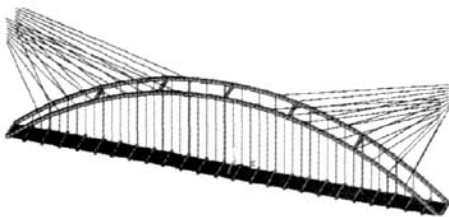


图2 斜拉拱桥有限元模型

Fig.2 FEM of the cable-stayed arch bridge structure

3 静风稳定分析

3.1 静风荷载

10 m 高度处的设计风速 $v_{10} = 30$ m/s,斜拉拱桥各构件在基准高度 Z 处对应风速按下式进行计算:

$$v_z = (Z/10)^{0.16} v_{10} \quad (4)$$

笔者仅考虑了主梁和拱肋的静风荷载,其中主梁按照三分力(阻力、升力和升力矩)施加,而拱肋只考虑了迎风阻力作用.静风荷载可按照《公路桥梁抗风设计规范》^[7]中的有关公式进行计算.需说明的是本文中计算的静风荷载不随结构变形而发生改变,其中,主梁的三分力系数 $C_H = 1.3, C_V = 0.32, C_M = 0.1$.

3.2 计算结果与分析

采用有限元软件 ANSYS 对具有预张力构件的结构进行屈曲分析时,必须先进行静力分析,且在静力分析中应打开预应力开关 PSTRES 考虑构件的预应力效应.图3为斜拉拱桥面外稳定系数随风速的变化.可以看出:①斜拉拱桥在设计风速 v_{10} 下的面外稳定系数与无风状态($v = 0$ m/s)下的面外稳定系数相差无几,表明此类结构具有很好的抗风稳定性;②斜拉拱桥的面外稳定系数随风速的增大而减小,且在风速增大到 $2v_{10}$ 附近时出现拐点,在此风速之前,结构横向稳定性降低很小,而在此风速之后,结构横向稳定性则显著降低,这主要是由于前者的结构失稳形式为拱肋反对称双波侧倾(图4(a)),而后的结构失稳形式为拱肋对称单波侧倾(图4(b)),拱肋的反对称变形使左、右半跨内的静风荷载作用得到抵消.这说明增大风速将改变结构的面外失稳形式,而面外失稳形式又反过来影响静风荷载对结构横向稳定性的作用.

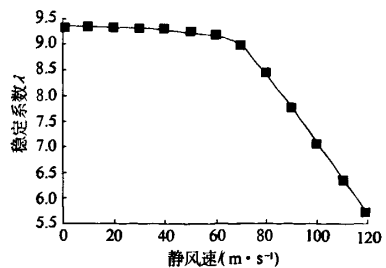


图3 面外稳定系数 λ 随风速的变化

Fig.3 Variation of the lateral stability safety factor λ with the wind velocity

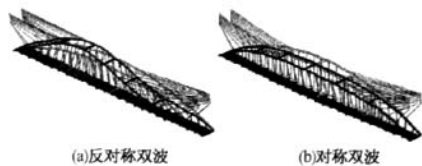


图4 结构面外失稳形式

Fig.4 Buckling form of the cable-stayed arch bridge structure

4 索对结构横向静风稳定性的影响

以设计风速 v_{10} 作用下的斜拉拱桥为研究对象,分别选择索预张力、索塔高度、索距、拉索布置位置等参数作为变量,研究静风荷载作用下索结构对斜拉拱桥横向稳定性的影响。

4.1 索预张力的影响

将原桥索预张力分别增大或减少 15%、30%,计算结果如图 5 所示。结果表明,索预张力对静风荷载作用下结构横向稳定性的影响很大,结构面外稳定系数随索预张力的增大而增大,其变化大致呈线性关系。可见,索预张力是提高斜拉拱桥横向静风稳定性能的一个积极因素。

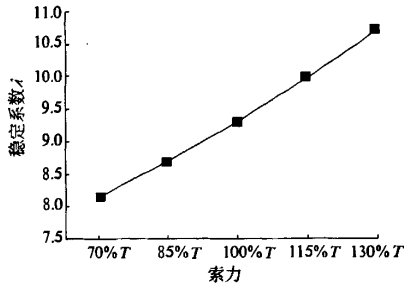


图 5 面外稳定系数 λ 随索预张力的变化
Fig.5 Variation of the lateral stability safety factor λ with the initial cable tension

4.2 索塔高度的影响

索塔高度 H 是指从桥面与索塔交界处以上的高度。通过改变索塔高度 H (近似认为是最高拉索的锚固高度) 与跨径 L 的比值,研究索塔高度对静风荷载作用下斜拉拱桥横向稳定性的影响,计算结果如图 6 所示。可以看出,索塔高度对静风荷载作用下结构横向稳定性的影响显著,在 H/L 由 0.15 增大到 0.35 时,结构面外稳定系数提高了近一倍,且随索塔的增高,有使其影响增大的趋势。但较大的塔高会增加索塔及拉索的材料用量,并给施工带来困难。斜拉桥塔高与主跨比值宜选用 0.18~0.25^[8],斜拉拱桥中,拉索锚固在拱肋上,因此塔高应计入拱矢高的影响,综合考虑结构的稳定性、经济性及美学效果,就本文涉及的桥梁型式,推荐索塔高度与主跨比值 H/L 宜取为 $0.22 + 4(f/L)^3 / (1 + 8(f/L)^2)$ 左右。笔者研究的斜拉拱桥塔高宜为主跨的 0.24 倍。

4.3 索距的影响

将原桥索距由 8 m 增大为 16 m 和 32 m,计算结果见表 1。从表 1 可以看到,索距对静风荷载

作用下结构横向稳定性的影响较大,当索距由 8 m 增大到 16 m 和 32 m 时,结构面外稳定系数分别下降了 24.5% 和 35.3%。其主要原因是拉索相当于对拱肋提供弹性支撑,当拱肋上的索距增大后,相邻两弹性支撑间的拱肋弧长也相应增大,这样拱肋的横向刚度必然降低。

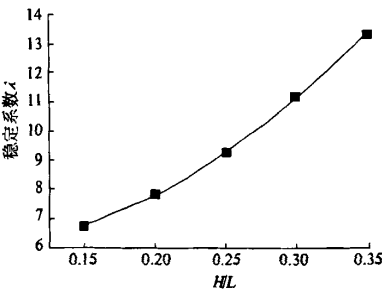


图 6 面外稳定系数 λ 随索塔高度的变化
Fig.6 Variation of the lateral stability safety factor λ with the tower height

表 1 不同索距下的结构面外稳定系数

Tab.1 Lateral stability safety factor λ at different cable distance

索距/m	稳定系数 λ	失稳形式
8	9.317	面对反对称双波
16	7.654	面外反对称双波
32	6.815	面外对称单波

4.4 拉索布置位置的影响

将原桥拉索左、右半跨对称水平移动 -16 m、-8 m、+8 m 和 +16 m (“-”表示向拱脚移动,“+”表示向拱顶移动)。计算结果如表 2 所示。图 7 为静风荷载作用下斜拉拱桥面外稳定系数随拉索布置位置的变化。从表 2 和图 7 可以看出,拉索在拱肋上的锚固位置对静风荷载作用下的结构横向稳定性有显著影响,且能改变结构的失稳形式。随拉索在拱肋上的锚固位置从拱脚变化到拱顶,结构的面外稳定系数先增大后减小,在索面中心线位于拱肋四分点处达到最大,当索面中心线位于拱肋四分点偏拱脚一侧时,结构失稳形式为面外对称单波,而在拱顶一侧则变为面外反对称双波。这说明了拉索对斜拉拱桥横向静风稳定性能的贡献主要由拉索锚固点处的拱肋位移确定,而拉索锚固点处的拱肋位移则由结构的失稳形式确定。因此,索面中心线宜布置于拱肋四分点附近,既有经济性,又有较高的横向静风稳定性。

表 2 不同拉索布置位置下的结构面外稳定系数
Tab. 2 Lateral stability safety factor λ at different position of cable on the arch

移动距离/m	稳定系数 λ	失稳形式
-16	7.826	面外对称单波
-8	8.814	面外对称单波
0	9.317	面外反对称双波
8	9.241	面外反对称双波
16	8.867	面外反对称双波

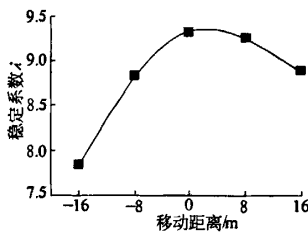


图 7 面外稳定系数 λ 随拉索布置位置的变化
Fig. 7 Variation of the lateral stability safety factor λ with the position of cable on the arch

5 结论

研究表明,斜拉拱桥具有很好的抗风稳定性,静风荷载对斜拉拱桥横向稳定性的影响由结构面外失稳形式决定,而静风荷载的大小又决定了结构的面外失稳形式。索结构可以有效地控制斜拉拱桥的面外失稳形式,并能显著提高静风荷

载作用下斜拉拱桥的横向稳定性能。通过分析表明,静风荷载作用下索结构影响斜拉拱桥横向稳定性能的主要因素(或参数)有索预张力、索塔高度、索距、拉索布置位置等。这些参数的合理选择与使用,将使斜拉拱桥获得更好的横向静风稳定性能。

参考文献:

- [1] 赵跃宇,杨相展,康厚军.斜拉拱桥动力特性分析[J].公路,2005(11):36-39.
- [2] 刘钊,吕志涛.有横撑系杆拱桥的侧向稳定承载力[J].工程力学,2004(3):21-24.
- [3] 张天航,李清富.多跨连续斜靠式异型拱桥的设计与稳定分析[J].郑州大学学报:工学版,2006,26(2):107-109.
- [4] 陈峰,胡大琳.大跨径钢管混凝土拱桥非线性静风稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):42-46.
- [5] 程进,江见鲸,肖汝诚,等.静风荷载作用下大跨度钢拱桥施工稳定性的参数研究[J].计算力学学报,2004,(1):50-55.
- [6] 李国豪.桥梁结构稳定与振动(修订版)[M].北京:中国铁道出版社,1996.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 中华人民共和国交通部,2004.
- [8] 刘士林,梁智涛,侯金龙,等.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2002.

Effect of Cable on the Lateral Stability Caused by Static - Wind Load of Cable - Stayed Arch Bridge

QIAN Xue - song, HU Zhao - tong, LI Jia - wu

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In this paper, ANSYS FEM program is used to study the lateral instability behavior caused by static - wind load of cable - stayed arch bridge. Furthermore, the parameters, including initial cable tension, tower height, cable distance and position of cable on arch is considered in theoretical study. The results show that cables can control buckling form effectively, and cable - stayed arch bridge has better performance of lateral wind - resistant stability. Initial cable tension, tower height can be increased, and cable distance can be reduced to improve performance of lateral wind - resistant stability, and the effect of tower height is most extraordinary, increasing tower height even doubled the performance of lateral wind - resistant stability nearly. Position of cable on arch has obvious effect on the performance of lateral wind - resistant stability, and cable - plane centerline is appropriate in the quartile of arch rib.

Key words: cable - stayed arch bridge; lateral instability; static - wind load; buckling form