

辅助索制振效果的有限元分析

魏建东¹, 杨佑发²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学 建筑工程学院, 重庆 400044)

摘要:建立了分析在斜拉桥中采用辅助索制振效果的有限元程序,以某大跨度斜拉桥模型为例,对辅助索的水平及弧形两种布置方案,考察了辅助索的阻尼、张力等因素对面外、面内制振效果的影响。分析表明,面外振动不易得到控制;对面内振动,增加辅助索的阻尼可提高制振效果,而辅助索的内力对制振效果影响不大;采用辅助索后,主索的张力变化不大。对比表明,弧形布置方案优于水平布置方案。本文的结论与现有的观测及实验结果相一致。利用所建立的程序,可对发生大幅索振的斜拉桥进行辅助索选材及布置的优化设计。

关键词:斜拉桥;斜拉索;振动控制;辅助索;有限元法

中图分类号:U441.3 **文献标识码:**A

Analysis of cable vibration control using cross ties by finite element method

WEI Jian-dong¹, YANG You-fa²

(1. College of Civil Engineering, southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. College of Architectural Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The program analyzing the effect of cable cross ties is developed by FEM in this paper. Taking the model of one full-scale large-span cable-stayed bridge as an example, level and arch allocations of cross ties are investigated respectively. Some factors influencing the effect of vibration control of in-plane and out-of-plane, such as the damping and the tension of cable cross ties are studied. It is concluded that the out-of-plane cable vibrations almost can not be suppressed, the in-plane vibrations can be controlled effectively by using more dissipative ties. However, the tension of cross ties has little influence on the results. Meanwhile, the tension in stayed cables changed little after using cross ties. It indicates that the arc-shaped allocation is more effective than the level one. The results are consistent with the reported observations and other studies. The program developed in this paper can be used in engineering, to choose the cable ties and their allocation.

Key words: cable-stayed bridge; stay-cable; vibration control; cable cross tie; FEM

随着斜拉桥跨度的增大,斜拉桥及其拉索越来越易发生振动。作为斜拉桥的主要构件,拉索振动有可能成为关系桥梁安全的重大问题。虽然斜拉桥还没有因斜拉索的振动而发生倒塌的报道,但经常性的振动易引起拉索的疲劳和腐蚀,缩短斜拉索的服

役期限,且相邻索的撞击,会引起人们的恐慌^[1]。

斜拉索的防振措施,可以从空气动力学方面与结构方面着手^[2]。迄今为止的实例,都是振动发生后在结构上采取措施。空气动力学方面由于问题的复杂性,理论分析比较困难,主要是利用风洞实验进行

模拟分析,其结果对于长索的适用性有待考察。而后者几乎对所有类型的振动都有效,它包括采用阻尼减振器、防振衬套和辅助索等方法。由于减振器安装位置离拉索的下端锚固点较近,对斜拉索中部的减振效果不够理想,特别是对大跨度斜拉桥的长索更是如此。岩柜岛桥的试验表明,防振衬套只能防止平衡振动,且效果有限,最后还是采用辅助索将拉索连接起来^[3]。因此,对于大振幅的拉索振动,最有效且现实的办法可能只有采用辅助拉索了^[4]。实践也证明了这一点^[3]。

辅助索法虽然非常有效,但其机理仍不清楚,要预先预测附加阻尼的效果有多大比较困难。1995年,YAMAGUCHI通过实验及数值方法对一简单的模型进行了分析^[5],对影响制振效果的因素进行了考察。

鉴于YAMAGUCHI的模型过于简单,笔者采用有限元法,以某大跨度斜拉桥模型的半个索面为例,进行辅助索法制振效果分析,探讨各种因素对制振效果的影响。目的是为了得到并验证一些具有普遍意义的规律,更主要的目的是建立一种辅助索制振效果的分析方法,为实际工程中辅助索的优化设计提供依据。

1 有限元分析步骤

笔者以文献[6]中的大跨度斜拉桥模型为例进行探讨,具体参数见原文献。辅助索法制振效果有限元分析的大致步骤如下:

(1)确定斜拉桥的初始构形,包括为达到设计位形的调索过程。计算过程中应考虑大跨度斜拉桥的各种几何非线性。

(2)确定所要分析的索面,输出有关信息。其中包括各索的物理量、端点的空间位置及其它状态量。

(3)确定所要采取的制振方案。从而确定辅助索与各斜拉索连接点的位置坐标,同时给出辅助索的基本参数。辅助索可以有多种布置形状,其中有两种方案比较理想^[7],一是对主缆作比较均匀的分割;另一种试图使所有索以直角相交,由于此时索网与MITCHELL体系相似,给人一种舒适的外观。所讨论斜拉桥模型的两种辅助索布置方案对应的索网如图1所示。

(4)对形成的空间索网进行有限元法的单元划分,计算中采用空间桁架单元。

(5)对索网进行调索,使辅助索的张力达到设计值,由此确定索网的初始构形。为此,文献[8]首先

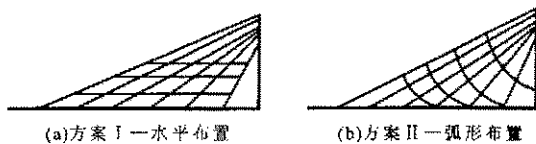


图1 辅助索布置

建立了索网的分析方法,本领域内的经典算例证明所建立的方法和程序完全正确。

(6)施加相应干扰,计算给定点的对应振动时程。对每一种工况,给予最长索一干扰,计算其中点的对应位移时程。时程分析采用NEWMARK法。拉索结构阻尼用对数衰减率表示,试验表明^[6], $\delta = 0.007 \sim 0.015$,拉索越长,阻尼越大。在本文计算中,斜拉索的一阶阻尼比取为0.002。

(7)由振动时程曲线观察振动特性,计算对应的等效阻尼。 $\xi = (v_n - v_{n+m}) / 2\pi v_{n+m}$,其中 v 为振幅, m 为周期间隔。

2 辅助索制振效果的有限元分析

2.1 索网的频率随辅助索内力的变化

随着辅助索张拉力的增加,所形成索网的频率略有增大,但变化甚微,见表1。因而,辅助索的张力对索网的频率影响很小。对比可知,方案Ⅱ比方案Ⅰ对应的频率大,这从一个侧面说明方案Ⅱ比方案Ⅰ可更有效地提高索网频率,从而抑制振动的发生。

表1 不同张拉力下索网的频率/ $\text{rd} \cdot \text{s}^{-1}$

拉力/kN		4.45	13.35	22.25	31.15
一阶	I	1.186 3	1.187 7	1.189 1	1.190 5
	II	1.188 8	1.194 8	1.200 5	1.206 2
二阶	I	1.372 5	1.375 1	1.377 7	1.380 3
	II	1.376 9	1.388 3	1.399 7	1.411 0
三阶	I	1.436 6	1.432 6	1.432 5	1.432 9
	II	1.635 8	1.644 6	1.653 6	1.662 6
四阶	I	1.632 9	1.636 1	1.639 3	1.642 6
	II	1.996 5	2.003 0	2.009 6	2.016 2

2.2 面外制振

在最长索的面外方向作用谐振力一小段时间,随后使拉索做自由衰减振动。取时间间隔为0.05 s,对此进行时程分析,得到最长索中点的振动时程曲线,进而对之进行分析。此时对应两种方案的各工况,得到的振动时程曲线形状基本相似,如图2所示。

2.2.1 变化辅助索的阻尼

使辅助索的阻尼为斜拉索阻尼的整数倍,等效阻尼比计算结果如图3所示。由图可知,对于水平方

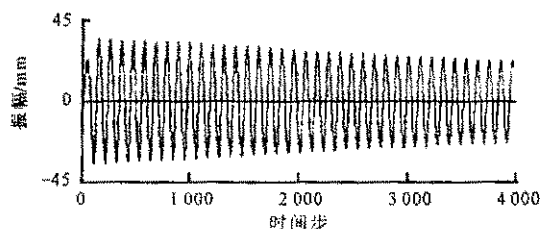


图2 面外振动时程曲线

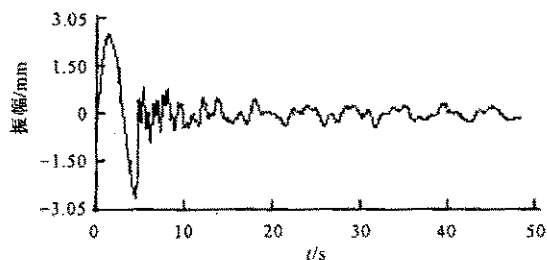


图5 方案I的面内振动时程曲线

到的等效阻尼比如图6所示。由图可知：对方案I，增加辅助索的阻尼可以大幅度地提高制振效果；对方案II，增加辅助索的阻尼，所得的等效阻尼比反而大幅度地减小，这与此时振动曲线的形状变化有关。

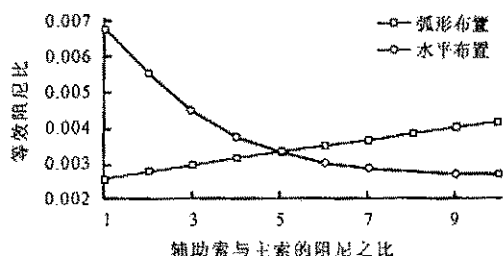


图6 面内变化辅助索阻尼得到的等效阻尼比

图7所示为阻尼之比分别为1和20时的时程曲线初始阶段的峰值变化情况。大阻尼情况下，在振动的初期，振幅大幅度地减小，随后缓慢衰减；小阻尼情况下，在振动的初期，振幅减小幅度相对小一些，随后衰减较快，表现为等效阻尼比值反而较大。因此，对本方案的面内振动，不能只以等效阻尼比的大小来判断制振效果。

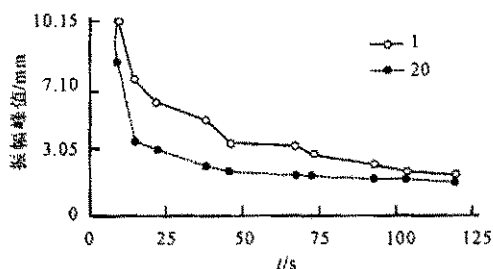


图7 振动时程曲线的峰值变化

2.3.2 内力对面内制振效果的影响

辅助索的阻尼取为拉索的5倍，使内力在4.45~84.55 kN范围内，以8.9 kN的增量变化。对于方案I，计算结果如表2所示。由表2可知，对于面内振动，提高辅助索的内力，制振效果基本不变。

考虑到方案II的面内振动特性，不再计算其等效阻尼比，仔细对比各种张力情况下的振动时程曲线发现：张拉力大于13.35 kN后，各时程曲线的

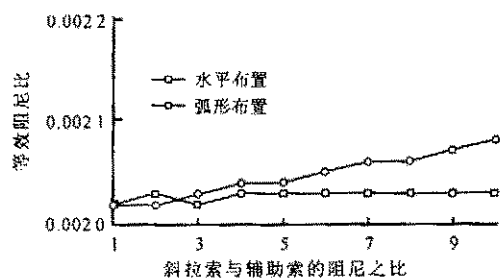


图3 面外变化辅助索阻尼所得等效阻尼比

案，增加辅助索的阻尼对面外制振没有任何效果；对弧形方案，则可略微增加制振效果。

2.2.2 内力对面外制振效果的影响

辅助索的阻尼取为拉索的5倍，变化辅助索的内力，等效阻尼比计算结果如图4所示。由图可知，对于面外振动，提高辅助索的内力可以增加制振效果，但增加的趋势随内力的继续增加而趋于平缓。这主要是因为原拉索的扇面并非和水平面完全垂直，所形成的索网为空间索网，在面外有一定的刚度。弧形方案比水平方案效果更好，且存在最佳内力使等效阻尼比出现峰值。方案II的最佳内力约为49 kN。

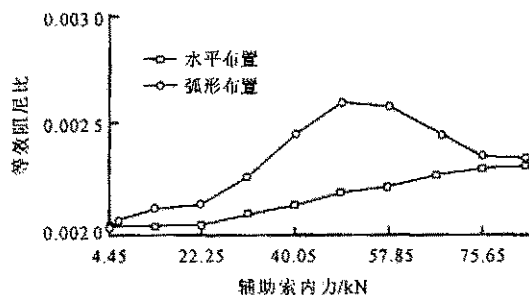


图4 面外变化辅助索内力所得等效阻尼比

2.3 面内制振

对方案I，变化辅助索的阻尼或内力，得到的振动时程曲线都与图2相似；对方案II，得到的振动时程曲线形状与以上各种工况的差别较大。在干扰停止作用的很短时间内，振幅急剧减小。图5所示为在辅助缆索拉力为4.45 kN，取辅助索的阻尼与斜拉索相等时的结果。

2.3.1 变化辅助索的阻尼

辅助索的阻尼以斜拉索阻尼的整数倍变化，得

包络线基本重合,增大辅助索内力,制振效果不变;而在此之前,制振效果随辅助索内力的增加而加大。由表 2 可知,方案 I 也不违反此规律,由此可确定辅助索内力取值的下限。

表 2 方案 I 一面内变化辅助索的内力

辅助索内力 /kN	等效阻尼 /10 ⁻³	辅助索内力 /kN	等效阻尼 /10 ⁻³
4.45	3.25	48.95	3.34
13.35	3.37	57.85	3.31
22.25	3.38	66.75	3.29
31.15	3.40	75.65	3.29
40.05	3.38	84.55	3.23

2.4 主索张力的变化

为考察施加不同的辅助索张拉力时,主索内力是否会发生较大的变化,从而改变结构体系的内力分布状况,选择弧形制振方案进行计算分析。对于不同的辅助索张拉力,最长索下端张力大小的变化列于表 3。由表可知,主索内力变化较小,且随辅助索张拉力的增加基本呈线性变化。

表 3 主索张力随辅助索张力的变化

辅助张力/kN	主索张力/kN	变化量/kN
0	20 870	0
4.45	20 947	77
13.35	21 035	164
22.25	21 124	254
31.15	21 216	345
40.05	21 309	438
48.95	21 408	538
57.85	21 499	629
66.75	21 597	726
75.65	21 700	830
84.55	21 796	925

3 结 语

以上的数值分析表明:

(1)增加辅助索内力可以使索网的频率略有增加。由于辅助索的横截面面积、拉伸刚度以及张拉力相对主索的小得多,主索内力以及整个索网的频率受辅助索内力的影响较小。希望通过增加辅助索内力,提高索网频率,以达到制振目的的思路是不可取的。由振型分析可知,辅助索的主要作用是消除单索的大幅振动。

(2)对于面外振动,提高辅助索的阻尼无济于事,增加辅助索的内力可以小幅度地增加制振效果。对于弧形制振方案,辅助索的内力存在一最佳值。为多少能对拉索的面外振动起到控制作用,可在辅助索的连接上下工夫。如岩柜岛桥为防止拉索的面外振动,使辅助索的连接钢丝交叉,成为面外具有一定刚度的结构。

(3)对于面内振动,增加辅助索的阻尼可以大幅度地提高制振效果;而辅助索的内力一般影响不大。在辅助索的低张拉力范围内,制振效果随张拉力的增加而有所提高,随后就基本保持不变。连同(2)可以定出辅助索内力的大致取值范围。

(4)弧形制振方案的制振效果优于水平制振方案。

笔者建立了辅助索制振效果的有限元分析方法,对于两种不同的制振方案,确定了辅助索的内力、阻尼对制振效果的影响,得到了一些普遍的规律,可供工程界参考。对于具体工程中的斜拉桥,应进行具体计算分析,以确定辅助索的取材、布置及所需施加张拉力的大小。并进行各种辅助索布置方案的对比分析,为优化制振设计提供依据。

参考文献:

[1] WATSON S C,STAFFORD D. Cables in trouble[J]. Civil Engineering ASCE,1988,58(4):38—41.

[2] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996.

[3] 高际钦. 斜拉桥拉索的风振与防振措施[J]. 国外桥梁,1992,30(3):59—67.

[4] LILIEN J L, A PINTO DA COSTA. Vibration amplitudes caused by parametric excitation of cable stayed structures[J]. Journal of Sound and Vibration,1994,174(1):69—90.

[5] HIROKI YAMAGUCHI,HARSGA D NAGAHAWA-TTAL. Damping effects of cable ties in cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1995,54 & 55:35—43.

[6] NAZMY A Z, et al. Three dimensionl nonlinear static analysis of cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures. 1990,34(2):257—271.

[7] 汪 慧,郑宪政. 未来的大桥[J]. 国外桥梁,1998,36(1):54—59.

[8] 魏建东. 斜拉桥拉索的参数振动及其控制[D]. 成都:西南交通大学,1999.