

文章编号:1671-2579(2007)01-0099-05

带减振圈斜拉索的参数识别及损伤诊断研究

周 云, 易伟建

(湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 结合长沙湘江北大桥的带阻尼减振器拉索的索力检测数据, 采用有限元方法对考虑拉索抗弯刚度、斜度、垂度、减振圈的斜拉索进行分析计算。提出两个判别指标 ID1 和 ID2 进行了损伤诊断以及索力和抗弯刚度的识别。分析结果表明采用计算长度折减的基频法来计算索力是偏于安全的。

关键词: 斜拉桥; 索力测试; 损伤诊断

斜拉索作为斜拉桥的关键部件, 其重要性关系着斜拉桥的安全。由于车辆行驶振动、风振、风雨振和风雨侵蚀的影响, 斜拉索的大幅振动容易引起锚固端的疲劳, 因此通常对斜拉索增加减振装置来抑制拉索的振动。国内外许多学者对装有减振器的斜拉索振动行为进行了研究。Takano(文献[1])等在 Tsurumi Tsubasa 桥上同时使用高阻尼橡胶(HDR)和减振圈使得减振圈的安装位置比通常的位置降低。Y. L. Xu(文献[2])表明选择合适的减振圈参数能有效地抑制拉索振动, 还进行了带减振圈的室内斜拉索模态试验。国内外研究主要集中在如何考虑各种因素下的斜拉索振动计算, 以及如何优化减振圈的刚度和阻尼参数方面, 而对于服役桥梁斜拉索的损伤诊断以及参数识别则涉及较少。

本文以长沙湘江北大桥的索力测试频率结果为基础, 结合斜拉索的基本数据, 用有限元方法进行斜拉索索力和减振圈刚度的识别, 以及对拉索的服役状况进行损伤诊断。

1 工程实例

1.1 桥梁及索力测试概况

长沙湘江北大桥为双塔单索面预应力混凝土斜拉桥(图1)。斜拉桥长420 m, 索塔高53.73 m, 每塔有15对扇形拉索。对斜拉桥的索力采用频率法测定, 利

用东方噪声306动态测试分析系统和DASP分析软件进行分析, 把YD-62型加速度传感器绑在斜拉索上进行信号采集。

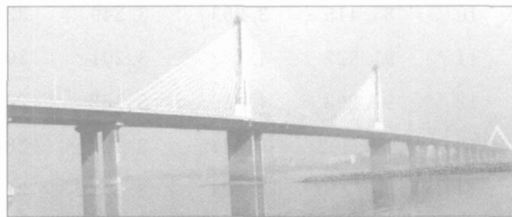


图1 长沙湘江北大桥全景图

长沙湘江北大桥上安装了粘弹性高阻尼减振橡胶圈, 另外用冷铸锚固装置锚固, 有效地抑制了拉索的风振。粘弹性高阻尼材料是一种合成橡胶, 阻尼值比一般橡胶大4~5倍, 阻尼圈安设于拉索塔、梁钢管出口处, 采用9050高阻尼材料, 硬度为50~55。拉索的构造为 $\phi 7$ 高强度钢丝, 外喷涂金属漆, 最外为PE防护层。

1.2 斜拉索基本参数及索力测试结果

斜拉索的基本参数如表1所示。斜拉索截面惯性矩用近似圆截面和六边形的惯性矩计算; 另外, 实际测试得到的斜拉索前8阶频率如表2所示。

2 参数识别评价指标与计算模型

2.1 考虑减振圈拉索的计算

收稿日期: 2006-06-27

基金项目: 湖南大学博士学科点专项基金编号: 20030532020)

作者简介: 周 云, 男, 博士研究生. E-mail: zhoyun05@126.com

对于考虑减振圈的斜拉索振动分析计算, 现有的有限元法、有限差分法以及混合法等, 难以从列式中分离出减振圈刚度或拉索张力进行反分析。采用有限元方法计算拉索的索力值是一种方便快捷的方法。本文采用 ANSYS 软件进行分析计算。减振圈采用 Com-

bine14 单元, 材料阻尼设为 0.3; 考虑抗弯刚度的拉索采用 Beam4 单元, 计算模型如图 2 所示。对于张拉力的模拟, 加力于拉索端部的方法需要考虑拉索的张拉伸长的影响。本文采用的是用增加温度的方法, 利用公式(1)计算需增加的温度大小。

表 1 斜拉索基本参数

拉索编号	索长/m	箱梁阻尼器位置/m	塔顶阻尼器位置/m	斜拉索倾角/(°)	每索钢丝面积/cm ²	钢索单位重/kg·m ⁻¹	圆形直径或六边形边长/cm	EI /MN·m ²	成桥索力 /kN
1	36.393	2.321	9.522	62.09	58.11	45.62	8.603(圆)	0.268	2 565
2	41.339	2.483	7.420	55.95	58.11	45.62	8.603(圆)	0.268	2 566
3	46.307	2.662	4.354	50.84	58.11	45.62	8.603(圆)	0.268	3 105
4	51.394	2.851	4.001	46.59	58.11	45.62	8.603(圆)	0.268	3 212
5	56.835	3.041	3.765	42.09	58.11	45.62	8.603(圆)	0.268	3 443
6	62.343	3.231	3.598	40.16	49.24	49.24	4.914(六)	0.315 6	3 564
7	68.012	3.416	3.476	37.72	49.24	49.24	4.914(六)	0.315 6	3 729
8	73.498	3.600	3.382	35.61	51.06	51.06	6.653(六)	1.06	4 121
9	79.567	3.776	3.309	33.84	60.12	60.12	12.26(圆)	1.11	4 373
10	85.415	3.953	3.249	32.20	60.12	60.12	12.26(圆)	1.11	4 652
11	91.327	4.123	3.201	30.80	60.12	60.12	12.26(圆)	1.11	4 617
12	97.293	4.286	3.162	29.38	81.20	63.74	6.872(六)	1.207	4 687
13	103.302	4.443	3.129	28.50	83.51	65.56	7.047(六)	1.335	4 504
14	109.350	4.594	3.101	27.55	83.51	65.56	7.047(六)	1.335	4 594
15	115.413	4.739	3.055	26.69	83.51	51.06	6.653(六)	1.06	4 218

表 2 斜拉索索力测试前 8 阶频率结果

拉索编号	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	Hz
1	3.860 5	7.652 0	11.179 9	14.111 2	17.536 6	21.524 2	25.733 1	29.252 6	
2	3.149 0	6.518 3	9.936 9	13.405 8	16.925 0	/	/	/	
3	3.041 2	6.084 9	9.155 6	12.281 7	15.455 2	18.675 0	/	/	
4	2.700 8	5.391 0	8.133 9	10.910 2	13.597 2	16.480 1	19.212 5	/	
5	2.470 7	5.007 4	7.501 7	10.035 2	12.574 1	15.109 1	17.697 7	/	
6	2.223 0	4.472 0	6.714 0	8.959 1	11.254 6	13.549	15.941 3	18.234 4	
7	2.080 6	4.181 2	6.277 4	8.376 5	10.518 9	12.619 9	14.818 3	16.919 7	
8	1.980 8	3.969 2	5.938 1	7.935 7	9.931 3	11.934 1	13.898 5	15.891 1	
9	1.742 7	3.536 1	5.303 4	7.102 7	8.867 0	10.671 1	12.470 0	14.329 8	
10	1.692 6	3.398 3	5.149 7	6.816 6	8.520 3	10.278 1	12.083 6	13.796 9	
11	1.577 5	3.151 3	4.724 2	6.316 6	7.888 2	9.494 0	11.108 3	12.723 4	
12	1.442 9	2.902 9	4.322 8	5.789 1	7.248 1	8.762 4	10.232 0	11.691 2	
13	1.305 5	2.615 7	3.935 8	5.288 2	6.572 5	7.909 7	9.250 5	10.614 5	
14	1.239 1	2.474 0	3.733 3	4.998 2	6.232 3	7.489 9	8.765 4	10.031 2	
15	1.284 7	2.561 9	3.841 6	5.141 3	6.417 5	7.729 5	9.010 1	10.320 8	

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \alpha \Delta T \quad (1)$$

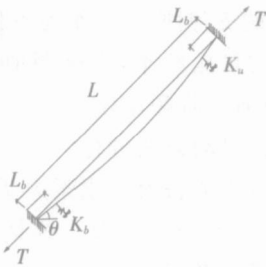


图 2 斜拉索计算模型

对于弹簧的位置,用设置硬点的方法在拉索单元上进行,单元的分段划分就能在弹簧位置自动分段。本文用 ANSYS 有限元软件进行索力计算,考虑了斜拉索的抗弯刚度、斜度、垂度,边界条件固定,不考虑非线性。为方便讨论,假设每根斜拉索其两端的减振圈刚度值相同。计算时先进行静力分析再进行模态分析。用任伟新(文献[4])的斜拉索模态试验结果作为与理论模型的验证,如表 3 所示,其中未有抗弯刚度信息,其随频率提高的差异也能看出抗弯刚度的影响。

表 3 计算模型结果与文献[4]试验结果比较

阶数	50 kN 拉索试验值/Hz	50 kN 拉索计算值/Hz
第 1 阶	7.60	7.53
第 2 阶	15.12	15.06
第 3 阶	22.75	22.59
第 4 阶	31.09	30.12

基于有限元列式,实际结构与边界相连接,其特征方程为:

$$(K - \lambda M) \{\phi\} = 0 \quad (2)$$

式中:K 为结构的刚度矩阵; λ 为特征值;M 为结构的质量矩阵; $\{\phi\}$ 为振型矩阵。

附加减震圈后,质量矩阵不变,在刚度矩阵相应单元自由度位置加入一边界条件修正矩阵 k_r ,建立的特征方程为:

$$[(k_r + K) - \lambda M] \{\phi\} = 0 \quad (3)$$

该次分析中,每改变一次减振圈刚度值大小,求解振型张成的空间发生变化,频率值也随之改变。理论上来说,对于两个未知参数的识别仅需两阶频率即可得适定问题。而本文用 8 阶频率能够保证识别过程的最小二乘精度,以得到更加可靠的索力及减振圈刚度值。

2.2 参数识别评价指标

用于计算的有限元模型,其计算的频率值应该为

以下几个参数的函数:

$$f_{cal} = f(T, L, EI, EA, \theta, \rho, k) \quad (4)$$

式中:T 为索力;L 为拉索长度;EI 为斜拉索抗弯刚度;EA 为抗拉刚度; θ 为斜拉索的倾角; ρ 为拉索密度;k 为阻尼支撑抗拉刚度值。L、EA、 θ 、 ρ 都为设计图纸上的值,可信度高;而 T 是未知数,但基本可知该真实值可按成桥索力值附近 $\pm 10\%$ 的范围考虑,重点是该值的大小。斜拉索的减振圈刚度值未知,但可知各拉索识别出来数量级应相同,差别较大的应该考虑是否为减振圈失效。

斜拉索的参数识别方法归纳为单参数识别和多参数识别,其目的都要使得评价指标最小。本文同时进行索力和减振圈支撑刚度的识别。利用两个评价指标 ID1 和 ID2, ID1 为损伤诊断初估评价指标, ID2 为进行参数识别的评价指标。

诊断过程分两步:① 损伤初步判别:利用斜拉索成桥索力为假设已知索力,设定阻尼的刚度为 0,初步根据 ID1 判别斜拉索的健康状况;② 索力与减振圈刚度识别:利用斜拉索和减振圈刚度值进行二维搜索,使满足 ID2 值最小为索力值和减振圈刚度值。

$$ID1 = \sum_{i=1}^n (f_{i, cal} - f_{i, mea}) / n \quad (5)$$

$$ID2 = \min \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{i, cal} - f_{i, mea}}{i} \right)^2} / n \right) \quad (6)$$

式中: $f_{i, cal}$ 为计算得到的第 i 阶频率; $f_{i, mea}$ 为测试得到的第 i 阶频率;n 表示可利用总的频率阶数。

ID1 值为正时说明斜拉索索力下降严重,正值越大说明越严重;ID1 为负时说明索力值与成桥索力相差不大,负值越大说明拉索索力越大。ID2 取 $1/i$ 作为权值,该权值合理考虑了高阶频率的影响,又体现了基频及前面各阶频率的重要性。ID2 为 0 时说明理论计算与现场测试完全相同;ID2 值越大说明计算结果由于索力计算的拉索索力和支座刚度值越不符合实际。参数识别的目的就是合理选择索力和支撑刚度值使 ID2 最小。

3 斜拉索的参数识别与损伤诊断

3.1 斜拉索健康状况的初步判别

利用判别准则 ID1 计算各拉索的频率,得到初步判断存在问题的 4[#]、8[#]、15[#] 共 3 根拉索的计算值(表 4)。对于一根两端固定的斜拉索来说,索力一定的情况下,施加减振圈支撑刚度于拉索上,会提高斜拉索的

振动频率。利用初步判别准则计算的 ID1 为正值说明该斜拉索在无减振圈的情况下用成桥时的索力计算斜拉索的振动是偏大的,说明斜拉索的实际索力比成桥索力大大降低,8# 索的情况比 4# 索严重。实际情况两端减振圈不可能完全失效,因此实际索力将更低。假设减振圈完全失效时,使某一索力计算频率与实测相同则成了索力值的最低估计。

如表 4 所示,4# 索和 8# 索分别下降 3.79% 和 12.9%。据 2001 年度的索力检测报告显示,大桥中跨 4 根 8# 索减振器已明显损坏,并于 2002 年进行了斜拉索减振器更换。2005 年 12 月进行了大桥全桥模态试验,结果显示全桥第 4 阶纵向弯曲振动频率为 2.002 Hz,与 8# 拉索的 1.980 8 Hz 相近,因此桥与索的内共振是其索力下降大的根本原因。对于 15# 拉索估计是由于资料参数错误或成桥索力不准造成的,以上 3 根索不进行第二步识别过程。

表 4 有损伤拉索的索力估计

拉索编号	ID1	最低估计/kN
4	+0.095 2	3 090.31
8	+0.296 3	3 588.22
15	-0.732 5	-

表 5 识别斜拉索索力及刚度结果

拉索编号	ID2	识别刚度值 / $\times 10^5$ kN · m ²	识别索力值 /kN	比成桥索力 升高降低/%	式(7)计算长度 计算索力/kN	改变计算长度 比识别值/%
1	0.056 71	3.0	2 724	6.184	2 525.82	-7.26
2	0.165 37	3.8	2 611	1.768	2 395.88	-8.25
3	0.026 79	4.6	3 196	2.921	3 091.12	-3.27
5	0.007 46	0.7	3 511	1.975	5 871.12	-9.42
6	0.010 37	1.5	3 613	1.373	3 379.93	-6.45
7	0.005 07	0.5	3 852	3.304	3 555.74	-7.70
9	0.005 74	6.1	4 313	-1.370	4 222.61	-2.10
10	0.002 91	5.1	4 682	6.411	4 613.69	-1.46
11	0.002 79	5.8	4 587	-6.470	4 601.99	3.23
12	0.003 14	2.73	4 750	1.348	4 648.03	-2.15
13	0.001 91	2.03	4 537	7.221	4 429.67	-2.36
14	0.001 96	4.1	4 529	-1.420	4 480.92	-1.06

且识别得到的弹簧刚度值基本在同一数量级之内,评价指标 ID2 的值不同,得到的最优化索力值和弹簧刚度值会有所不同,从工程的角度考虑 5% 的误差,不会造成对斜拉索损伤诊断的误判。

对于采用了减振圈的斜拉索,不能用通常的基频法中国算索力,在实际利用过程中,为了简化计算方

3.2 斜拉索索力与减振圈刚度识别

对于有限元分析,实际拉索的未知量为拉索的索力 T 及橡胶减震的支撑刚度 k ,作为正分析计算,需由该两值计算拉索的自振频率,当该两值符合实际情况时,则计算得到的前 8 阶频率使得 ID2 值最小。两值的搜索按照等步长摄动方法进行:

(1) 将 T 设置为成桥时拉索索力 T_B ,弹簧刚度的初设定值为 3×10^5 kN · m²,改变弹簧刚度值大小得到 ID2 最小的弹簧刚度值 k_1 。

(2) 按照一定的索力步长 ΔT 改变拉索索力大小,找到使 ID2 最小的弹簧刚度值 k_2 。

(3) 由计算规律得知,进一步增加或减小 ΔT 的大小,使 ID2 最小, k_3 值大小总为 $k_2 \pm (k_2 - k_1)$ 。因此从第三次开始,改变 ΔT 值大小的弹簧刚度搜索就一步完成。

(4) 比较对应各索力大小不同时的 ID2 值,总有一个为最小,对应最小 ID2 值时的索力值即为识别得到索力值。前 8 阶识别得到减振圈刚度值和索力值如表 5 所示。

由表 5 可以看出,由计算模型根据实测频率结果识别的斜拉索各索索力值基本围绕基准值随机分布。

法,往往采用索长折减的办法来修正,对索长较简单的计算方法为:

$$L_0 = L - (L_1 + L_2)\beta \quad (7)$$

式中: L_1 和 L_2 分别为梁端和塔端的锚固点至相应端减振器的距离; β 为 0~1 的系数,为了简便起见,通常取 0.5。用修正的长度来计算索力可得到表 5 中的结

果,其与识别的索力值相比的结果也列于其中。由 12 根拉索的计算结果可以看出,除了由于识别误差导致 1 根数值比识别值大以外,其余各索的计算值均比识别值小,且短索的计算值差得较多,主要因为短索 L_1 和 L_2 值较大造成。因此在实际操作中,用式(7)取 $\beta = 0.5$ 的修正计算长度而识别索力值是偏于安全的。

4 结论

建立两个评价指标 ID1 和 ID2,用两步识别法对长沙湘江北大桥的带减振器的 15 根斜拉索进行了损伤诊断及索力和支撑刚度识别,得到的主要结论如下:

(1) 本文用精确的有限元计算模型进行了 15 根斜拉索的计算,用两步识别法成功对其进行了健康诊断以及索力和支撑刚度的识别,考虑了多阶频率影响的索力识别值能够真实反映拉索的健康状况。

(2) 用基频法考虑索长折减来计算带减振圈的斜拉索能方便地用于工程实践,计算证明当 β 取 0.5 时计算索力值是偏于安全的。

(3) 对于斜拉索而言,计算模型本身会带来系统误差,建议桥梁的检测工作应直接给出测试的前若干

阶频率值,依次对未来的检测工作提供参考值。

对于斜拉桥索力的判别需要经过多次测试,结合以往的资料以及拉索现场调查,桥面线形情况,通过专家知识综合判别,是一个复杂的系统工程。应该指出本文仅从一个方面提供了参考依据。

参考文献:

- [1] Haruo Takano, Masafumi Ogasawara, Noboru Ito etc. Vibrational Damper for Cables of Tsurumi Tsubasa Bridge [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997; 807~818.
- [2] Y. L. Xu, Z. Yu. Vibration of Inclined Sag Cables with Oil Dampers in Cable - Stayed Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(4): 195~203.
- [3] Y. L. Xu, S. Zhan, J. M. Ko etc. Experimental Study of Vibration Mitigation of Bridge Stay Cables [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(9): 977~986.
- [4] 任伟新, 胡卫华, 林友勤. 斜拉索模态试验参数研究 [J]. 实验力学, 2005(1).
- [5] 郑 罡. 斜拉索张力测试和参数评估的理论和应用 [J]. 土木工程学报, 2005(3).

中越两国口岸公路对接江城举行会谈

2007 年 1 月 25 至 26 日, 中华人民共和国云南省江城县与越南社会主义共和国奠边省勐念县龙富一阿巴寨口岸公路对接点会谈在江城县举行。

中国云南省江城县人民政府县长杨俊华为团长的中方代表团一行在中越边境会见了越南奠边省外事厅厅长阮文幸为团长的代表团, 就双方口岸公路对接进行了友好而亲切的商谈。

龙富一阿巴寨口岸公路, 是中国云南省江城县与越南奠边省勐念县在 2005 年 3 月 2 日在江城友好会谈达成的共识。为早日实现口岸公路互通, 促进社会经济发展, 双方经过努力, 于 2007 年 1 月 25 日上午, 在 3 号界碑公路对接点进行了实地现场会谈, 并共同进行了勘测, 确定了双方的对接点为 3 号界碑附近, 概略高程为 948 m, 确定了双方对接公路宽度为 14 m。下午, 双方在江城县进行了亲切的交谈, 杨俊华和阮文幸团长各自介绍了江城县和勐念省的基本情况, 双方都表示了开通此公路的重要性和对当地经济发展的影响, 认为口岸申报成功后中越双方将会有更大发展空间, 将不断扩大双方的对外贸易等多项合作。

26 日, 双方代表团团长在江城县新辉宾馆签定了中国云南省江城县与越南社会主义共和国奠边省勐念县龙富一阿巴寨口岸公路对接点会谈纪要, 并进行了合影留念。