

系杆拱桥吊杆索力转移的优化设计

余睿, 袁建伟

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 系杆拱桥索力转移的优化方案设计是吊杆更换的一项重要内容, 选择合理有效的索力转移优化方案, 能有效避免吊杆集中力现象, 保障桥梁结构稳定及运营安全。文中以 VBA 为平台计算吊杆在等步长和非等步长情况下更换吊杆的索力和应变及相邻吊杆的索力变化, 确定系杆拱桥吊杆索力转移优化设计方案。结果表明, 优化后索力均匀、结构受力合力、线形平顺。

关键词: 桥梁; 系杆拱桥; 吊杆; 索力转移; 索力优化; 振动频率法

中图分类号: U442.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0088-04

因所处环境恶劣、受力状态不合理、交通任务繁重及长期运营引起的材料老化、功能退化等, 系杆拱桥吊杆易产生 PE 套管破裂腐蚀、钢丝锈蚀的现象, 吊杆内钢丝严重受损易断裂, 将导致吊杆承载能力降低, 危及桥梁与人员安全。因此, 需更换损伤的吊杆。该文以东莞某吊杆拱桥加固改造工程为例进行新旧吊杆更换试验仿真分析, 提出二次索力等效转移的优化设计方案。

1 吊杆刚度修正

在理论计算时, 根据边界条件的差异进行刚度修正, 修正公式如下:

$$\Delta l = \frac{F_{\text{模}} l_{\text{模}}}{E_{\text{模}} A_{\text{模}}} = \frac{F_{\text{实}} l_{\text{实}}}{E_{\text{实}} A_{\text{实}}} \quad (1)$$

式(1)中 $F_{\text{模}} = F_{\text{实}}$, $A_{\text{模}} = A_{\text{实}}$ 。因此, 修正后的抗拉弹性模量为:

$$E_{\text{模}} = \frac{l_{\text{模}}}{l_{\text{实}}} E_{\text{实}} \quad (2)$$

2 更换吊杆前索力测量

由于试验吊杆锚固端与仿真分析存在一定差异, 仿真分析时引入等效计算长度, 记为 l_e 。吊杆的等效计算长度按下式修正:

$$l_e = l_0 - \omega(S_1 + S_2) \quad (3)$$

式中: l_0 为吊杆两锚固点之间的距离; S_1 、 S_2 为吊杆两端刚性长度; ω 为调整系数, 其值为 0.35 ~ 0.55。

式(3)中, S_1 、 S_2 、 l_0 均为固定常量, 故确定 l_e 的关键是调整系数, 只有选择合适的调整系数, 才能保证所测索力反映吊杆的真实受力。

根据振动频率法测量索力公式可计算某一时刻临时吊杆的索力值, 公式如下:

$$T = 4ml_e^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (4)$$

式中: T 为索力; m 为临时吊杆的线密度; f_n 为 n 阶吊杆的测量频率。

3 吊杆更换方案

吊杆拱桥的吊杆更换施工方法分为等步长及非等步长两种。在对某一根吊杆进行旧吊杆向临时吊杆索力转移时, 假设通过 n 步张拉可实现索力的转移, 第 i 次张拉的步长为临时吊杆设计索力值的 a_i , 第 i 次切割的面积为吊杆钢丝总面积的 b_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据各施工阶段的情况可得到各参数的递推公式, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。工况为 $2i-1$ 时:

$$A_{2i-1} = A_{2i-2} \quad (5)$$

$$F'_{2i-1} = F'_{2i-2} + a_i F'_0 \quad (6)$$

$$F_{2i-1} = F_{2i-2} - m a_i F'_0 \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_{2i-1} = \frac{-m a_i F'_0}{E A_{2i-1}} \quad (8)$$

工况为 $2i$ 时:

$$A_{2i} = A_{2i-1} - b_i A_0 \quad (9)$$

$$F_{2i} = F_{2i-1} - F_{2i-1} \frac{b_i A_0}{A_{2i-1}} \left(1 - m \frac{E A_{2i}}{E A_{2i} + E' A'} \right) \quad (10)$$

$$F'_{2i} = F'_{2i-1} + F_{2i-1} \frac{b_i A_0}{A_{2i-1}} \frac{m E' A'}{E A_{2i} + E' A'} \quad (11)$$

$$\Delta \varepsilon_{2i} = \frac{F'_{2i} - F'_{2i-1}}{E' A'} \quad (12)$$

式中: F'_0 为临时吊杆的吊杆力; m 为单位力作用吊杆位置处吊杆索力减少值; E 为旧吊杆的弹性模量; A_0 为旧吊杆截面的初始面积; E' 为临时吊杆的弹性模量; A' 为临时吊杆的截面面积; F_0 为旧吊杆力设计值。

若 $F_{2i-2} < m a_i F_0$, 说明工况 $2i-1$ 时旧吊杆剩余索力小于临时吊杆索力设计值的 a_i 倍的力, 此时张拉临时吊杆的力 F' 按下式计算:

$$F' = \frac{F_{2i-2}}{m} \quad (13)$$

系杆拱桥属于较复杂的多次超静定结构, 函数关系较复杂, 索力转移产生的影响与多个参数有关, 为制订可行、合理、有效的索力转移方案, 需找出各参数对索力转移的影响。

3.1 等步长张拉与切割模拟

在每级荷载张拉完成后, 切割一定比例的旧吊杆钢丝。如分 5 步等步长张拉临时吊杆, 则每次张拉临时吊杆索力设计值的 20%, 再切断旧吊杆 20% 面积的钢丝, 即 $n=5$ 、 $a_i=20\%$ 、 $b_i=20\%$ 。

3.2 非等步长张拉与切割模拟

为减小切割钢丝的破断力及钢丝破断对桥面产生的振动影响, 设计合理的方案使旧吊杆的索力呈线性减小很有必要。

(1) 以旧吊杆力的卸载曲线为优化对象。工况为 $2i-1$ 时, 将式(6)变形, 可求出 $2i-1$ 工况时张拉力的比例及临时吊杆的索力:

$$a_i = \frac{F_{2i-2} - F_{2i-1}}{m F_0} \quad (14)$$

$$F'_{2i-1} = F'_{2i-2} + a_i F_0 \quad (15)$$

工况为 $2i$ 时, 将式(9)代入式(10), 可计算得到 A_{2i} 。

对旧吊杆力进行线性优化, 得:

$$F_{2i-1} = F_0 \left(1 - \frac{2i-1}{2n} \right)$$

$$F_{2i} = F_0 \left(1 - \frac{i}{n} \right)$$

进而得:

$$a_i = \frac{1}{2nm} \quad (16)$$

(2) 对标高和旧吊杆的轴力进行共同优化。通过 VBA 编程, 计算不同情况下张拉与切割时吊杆索力的变化与应变, 根据计算结果选取方差最小及应力变化平均值最大的一组数据, 若方差最小值与应力变化平均值最大值不处于同一组数据, 则根据

实际情况选择最优方案。

4 工程应用

4.1 工程概况

广东东莞某吊杆拱桥跨径布置为 $(45+80+45)$ m, 全长 204.4 m。主孔为中承式吊杆拱, 边孔为双肋式上承拱, 主拱圈矢跨比为 $1:3$, 边拱圈矢跨比为 $1:6$ 。主拱肋和边拱肋截面均为方形中空截面, 主拱肋截面高度 2 m、宽度 1.2 m, 边拱肋截面高度 1.2 m、宽度 1.2 m。主拱圈跨中部位设 1 根上横梁和 2 根下横梁。全桥共 22 对吊杆, 采用 48 根 $\phi 7$ 钢丝, 吊杆截面面积 $A_0 = 1\,847.26 \text{ mm}^2$, 弹性模量 $E = 1.95 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 纵向间距 3.0 m。

桥面板简支于吊杆横梁上, 桥面铺装刚度小, 且拱肋刚度较大, 在吊杆更换过程中拱肋变形可忽略不计。因此, 桥面吊杆位置处的标高变化近似等于旧吊杆的应变积累。

4.2 有限元模型

图 1 为全桥仿真计算模型。其中 X 代表顺桥向, 吊杆编号分为上下游两侧, 沿着 X 方向从左向右命名为上 $1^\# \sim$ 上 $22^\#$ 和下 $1^\# \sim$ 下 $22^\#$, 其中数字为吊杆编号。桥梁理论计算荷载包括恒载+二期恒载+温度荷载。

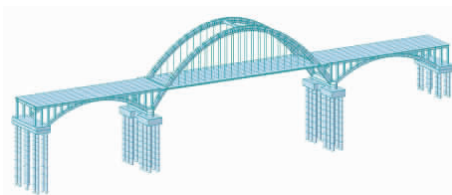


图 1 桥梁仿真模型

建模时作如下假设: 1) 吊杆更换过程中, 各材料均处于弹性工作状态; 2) 在整个施工过程中, 桥梁结构不受偶然荷载和活载的作用。

在更换吊杆的前后各布置 1 根临时吊杆(见图 2), 其面积及弹性模量通过转换与现实中的 4 束临时吊杆的参数一致。

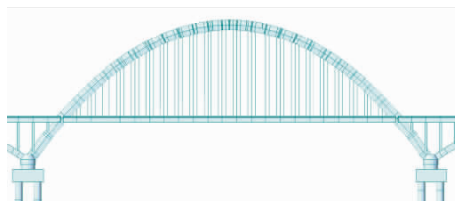


图 2 临时吊杆的布置

4.3 采集旧吊杆信息

4.3.1 修正吊杆刚度

由于篇幅有限,仅列举上11#吊杆模型的弹性模量与实际弹性模量(见表1)。

表1 上11#吊杆模型的弹性模量与实际弹性模量

项目	取值
实际长度/mm	19 062
模型长度/mm	18 574
实际弹性模量/ $[\times 10^5 (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})]$	1.95
模型弹性模量/ $[\times 10^5 (\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})]$	1.90

4.3.2 索力测量

采用振动频率法及油压表读数法进行索力测试,对上11#吊杆及前后1根吊杆的索力进行测量,通过计算,选取方差和偏差最小的调整系数。调整系数与总体误差见图3,两种方法的索力测量结果及其偏差见表2。

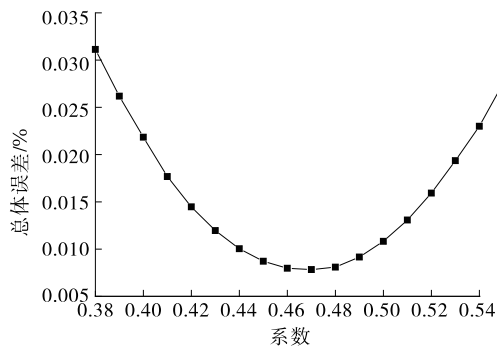


图3 调整系数与总体误差

表2 两种方法的索力测量结果及其偏差

测量方法	索力/kN	偏差/%
振动频率法	312.6	6.17
油压表读数法	325.2	10.31

由图3可知:调整系数取0.47时,方差最小,索力值与设计值更相符。

由表2可知:油压表读数法测量索力与设计值的偏差最大,这是因为油压表的精度不够及油管中油压的损失;振动频率法的偏差在允许范围内,且测量方便,材料成本低,可重复利用。因此,采用振动频率法测量索力。

采用振动频率法测量上11#吊杆相邻吊杆的索力,结果见表3。

由表3可知:振动频率法的读数偏差仍较大,这是因为振动频率法的索力公式不仅与频率有关,还受抗弯刚度、边界条件、减震器等影响。因此,参考

表3 上11#相邻吊杆的索力及其偏差

吊杆编号	长度/mm	频率/Hz	索力/kN	偏差/%
9	18 359	3.52	281.4	3.84
10	18 833	3.58	307.0	-5.24
12	19 061	3.57	313.1	-5.72
13	18 784	3.59	307.8	-5.49

文献[3]中的索力公式进行优化。对于 $0 \leq \xi \leq 18$ 的吊杆,取 $l_e = 0.95l$,得:

$$T = \begin{cases} 3.61ml^2 f^2 & 0 \leq \xi \leq 18 \\ m \left(2lf - \frac{2.363}{l} \sqrt{\frac{EI}{m}} \right)^2 & 18 < \xi \leq 210 \\ 4ml^2 f^2 & 210 < \xi \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\xi = \sqrt{T/(EI)}l$ 。

根据式(17)求得的相邻吊杆索力及其偏差见表4,与经典公式求解的比较见图4。

表4 上11#相邻吊杆的计算索力及偏差

吊杆编号	计算索力/kN	偏差/%
9	275.9	2.00
10	300.3	3.36
12	305.9	-3.34
13	300.42	2.46

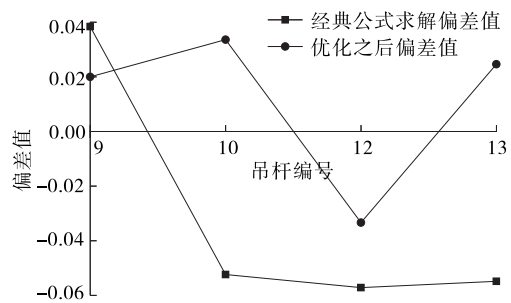


图4 上11#相邻吊杆的索力偏差值对比

由图4可知:经过优化计算的索力值偏差更小,与压力环测出的数据更相符。

4.4 张拉步长的确定

4.4.1 等步长张拉切割法

临时吊杆截面采用 $\phi 15.2$ 普通钢绞线,分析上11#临时吊杆分1~10步等步长张拉时张拉次数对索力转移的影响。旧吊杆的拉应变为正,压应变为负。计算结果表明:部分工况之间相差较大;部分工况未开始,旧吊杆的轴力已经为零。说明等步长张拉法不合理。

4.4.2 非等步长张拉切割法

采用以下两种优化方案:1) 以旧吊杆力的卸载曲线为优化对象,根据式(16),得: $a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=13.33\%$, $b_1=13.33\%$, $b_2=25.25\%$, $b_3=16.77\%$, $b_4=20.06\%$, $b_5=33.53\%$ 。2) 对标高和旧吊杆的轴力同时进行优化, $\sum_{i=1}^n a_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n b_i = 1$ 。为减少计算次数并考虑实际情况,每次切割根数 ≥ 3 ,且张拉比例 $\geq 5\%$ 、 $\leq 20\%$,每次调整张拉比例为 5% 。两种优化方案下的参数值见表5。

表5 两种优化方案下的参数值

i 值	以旧吊杆轴力为主方案下的参数值/%		标高及旧吊杆轴力同时优化方案下的参数值/%	
	a_i	b_i	a_i	b_i
1	13.33	14.39	10.00	12.50
2	13.33	25.25	10.00	16.67
3	13.33	16.77	10.00	22.92
4	13.33	20.06	15.00	22.92
5	13.33	33.53	10.00	24.99

等步长、非等步长以旧吊杆轴力优化为主和标高及旧吊杆轴力共同优化时 11# 吊杆应变变化和应变积累对比见图5、图6。由图5、图6可知:对标高及旧吊杆轴力共同进行优化,各工况下的应变变化波动较小,且处于“0”线上下呈规律波动;各工况完成后的应变积累也最小,更换吊杆的过程中对桥面结构产生的变化更小。

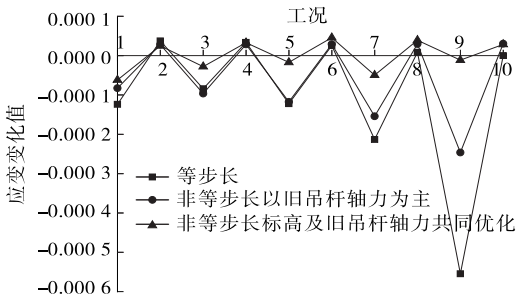


图5 11# 吊杆应变变化

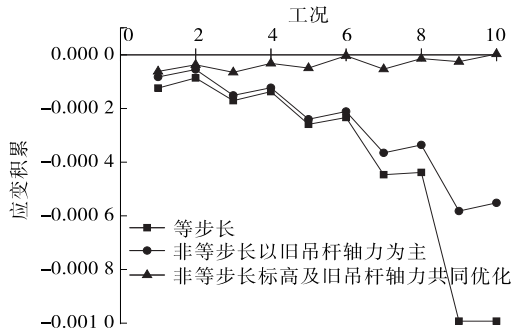


图6 11# 吊杆应变积累

以标高及旧吊杆轴力共同优化方案进行施工时,计算仿真值与实际值的对比见图7~9。由图7~9可知:以标高及旧吊杆轴力共同优化方案进行施工,仿真分析结果基本与实际情况相符。

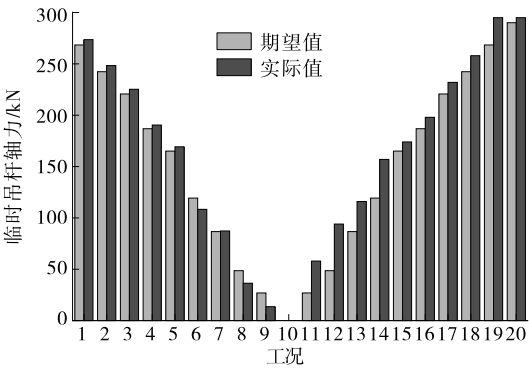


图7 上 11# 旧吊杆轴力的期望值与实际值

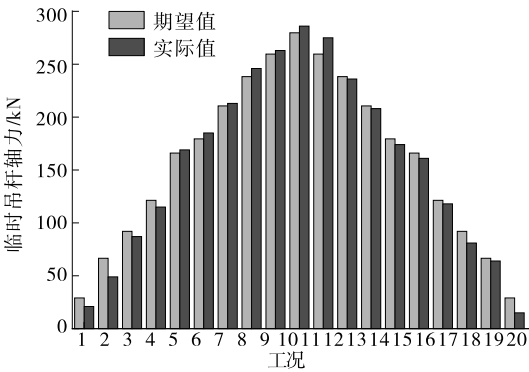


图8 上 11# 临时吊杆轴力的期望值与实际值

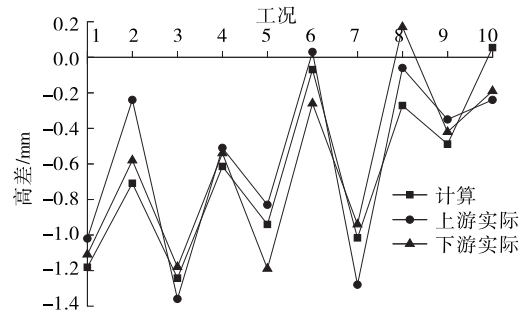


图9 11# 吊杆的计算高差与实际高差

5 结论

- (1) 振动频率法的读数偏差在允许范围内且取样效率高,换索工程采用振动频率法测量索力可行。
 - (2) 根据吊杆的实际情况修正振动频率法更适合测量吊杆。
 - (3) 采用标高及旧吊杆轴力共同优化非等步长
- (下转第 132 页)

有差别,其中美国规范理论值略大于中国规范理论值。当路面平整度较差时,冲击系数计算值大于中国和美国规范理论值。

参考文献:

- [1] Yin X F, Cai C S, Fang Z, et al. Bridge vibration under vehicular loads-tire patch contact versus point contact [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010, 10(3).
- [2] Chen S R, Cai C S. Accident assessment of vehicles on long-span bridges in windy environments [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92.
- [3] Christoph Czaderski, Masoud Motavalli. 40-year-old full-scale CFRP plates anchored using gradient method [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38.

- [4] 殷新锋, 刘扬, 彭晖, 等. 路面破损的桥梁在车辆作用下冲击系数分析 [J]. 振动工程学报, 2013, 26(4).
- [5] Yin Xinfeng, Fang Zhi, Cai C S. Lateral vibration of high-pier bridges under moving vehicular loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3).
- [6] 殷新锋, 丰锦铭, 刘扬. 考虑桥面等级退化影响的风—车流—桥梁耦合振动分析 [J]. 工程力学, 2016, 33(3).
- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD bridge design specifications [S].
- [8] Association of State Highway and Transportation of Officials (AASHTO). Standard specifications for highway bridges [S].
- [9] CSA International. Canadian highway bridge design code [S].

收稿日期: 2019-02-25

(上接第 91 页)

张拉切割法,使旧吊杆轴力呈线性减小的同时,也使吊杆位置处的桥梁标高变化呈规律性上下波动,虽然张拉比例的控制精度不够精确,但基本符合工程要求,可应用于系杆拱桥的换索工程。

参考文献:

- [1] 赵洋. 系杆拱桥吊杆更换研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 王欣, 虞根森, 俞峰. 拱桥吊杆更换的二次索力等效置

换 [J]. 中国建材科技, 2011, 20(5).

- [3] 任新伟, 陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(11).
- [4] 李新平. 空间系杆拱桥吊杆张拉控制分析 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2004, 32(7).
- [5] 聂磊. 危旧吊杆拱桥加固改造关键技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2010.
- [6] 王春龙, 饶瑞. 系杆拱桥吊杆更换的索力优化分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015(6).

收稿日期: 2019-03-07

(上接第 126 页)

桥破损、开裂、刮伤的斜拉索 PE 套管; 加强运营期观测, 定期进行健康检测与评定。

参考文献:

- [1] 胡剑, 张少勇. 大跨度三塔斜拉桥技术状态检测与评估 [J]. 公路, 2018(7).
- [2] 刘金平. 独塔混合梁斜拉桥承载力的检测与评定 [J]. 世界桥梁, 2011(4).
- [3] 姚蓓, 张启伟. 钢斜拉桥运营期耐久性与易损性监测 [J]. 中外公路, 2016, 36(1).
- [4] 梅霄云. 在役带协作跨预应力混凝土斜拉桥承载力分析及寿命预测 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [5] 李鸥, 侍刚, 王波, 等. 运营期桥梁斜拉索的技术状况检测 [J]. 世界桥梁, 2017(4).
- [6] 刘瑞军. 营运斜拉桥检测与安全评价 [D]. 石家庄: 石家

庄铁道大学, 2015.

- [7] 张泽民. 大型城市桥梁检测评估方法及应用分析 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [8] 何宇. 既有斜拉桥结构的检测及承载能力评定 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] JTG/T J21-2011, 公路桥梁承载力检测评定规程 [S].
- [10] JTG 3362-2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- [11] JTG/T D65-01-2007, 公路斜拉桥设计细则 [S].
- [12] 伍静, 单积明, 向勇. 重庆东水门公轨两用斜拉桥荷载试验研究 [J]. 公路与汽运, 2016(1).
- [13] 孙璇, 刘玉擎, 江祥林. 斜拉桥混合梁结合段受力性能研究 [A]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年年会暨全国桥梁学术会议 [C]. 2013.

收稿日期: 2019-07-10