

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.026

引用格式: 胡翌刚, 杜泓毅, 曾振华, 等. 基于现状索力评估和限载通车的斜拉桥换索设计[J]. 公路与汽运, 2024, 40(4): 118-123.

Citation: HU Yigang, DU Hongyi, ZENG Zhenhua, et al. Cable force evaluation based on current condition and the cable-change design of cable-stayed bridge with limited traffic capacity[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(4): 118-123.

基于现状索力评估和限载通车的斜拉桥换索设计*

胡翌刚¹, 杜泓毅², 曾振华^{3,4}, 吴坤平^{3,4}, 黄斌^{3,4}

(1.湖南省交通建设质量安全监督管理局, 湖南长沙 410116; 2.湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 3.湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410200; 4.湖南省工程结构安全与监测(控)工程技术研究中心, 湖南长沙 410200)

摘要: 以某大跨度混凝土斜拉桥斜拉索更换为背景, 采用适度指标模型对现状索力进行评估, 计算单索索力评估值, 分析各索的基本评估值分布规律, 得出现状索力状况不佳、不适宜进行索力优化的结论, 提出等索力替换的换索原则; 结合拉索张拉端垫板过高的现状, 对索长进行修正, 解决斜拉索锚固作用位置不合理的问题; 通过对换索过程的有限元计算分析, 以主梁应力和索力变化较小为控制目标, 提出单边换索、单边通行、换索间距在3个索号以上的换索方法及换索过程中限载6 t小车正常通行、公交车以15 m的间距通行的交通管制措施。

关键词: 桥梁; 斜拉桥; 索力评估; 等索力替换; 索长修正; 限载通车

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)04-0118-06

斜拉桥斜拉索的寿命周期为20~25年。经过一段时间运营后, 斜拉索会出现钢丝腐蚀和疲劳、锚具松脱等病害, 影响桥梁的正常服役性能^[1], 需进行拉索更换。拉索更换过程中的索力确定有不同的原则, 对于中小跨径斜拉桥, 需通过换索优化成桥索力, 改善塔偏和主梁线形, 实现结构受力优化; 对于大跨度斜拉桥, 在索力调整上大都持谨慎的态度, 特别是20世纪八九十年代建设的斜拉桥, 施工技术较落后, 主梁病害多, 成桥斜拉索索力对主梁应力非常敏感^[2], 索力调整不利于结构受力。本文以某大跨度混凝土斜拉桥为例, 提出一种基于现状索力评估

和限载通车的换索方法。

1 工程背景

某大跨度混凝土斜拉桥, 主桥跨径为169 m+444 m+169 m, 桥型布置见图1。主梁采用实心双主梁断面, 肋高2.5 m, 宽1.7 m, 横梁间距4.5 m, 主梁为纵向悬浮体系(见图2)。拉索呈扇形双索面布置, 每个塔柱双面为48对斜拉索、1对0[#]斜拉索。采用平行钢丝斜拉索, 两端设置LM7型冷铸锚具。主塔呈花瓶形, 塔高141.5 m, 塔身为矩形空心断面。常规定期检查时, 对锚头渗水和表观缺陷较严

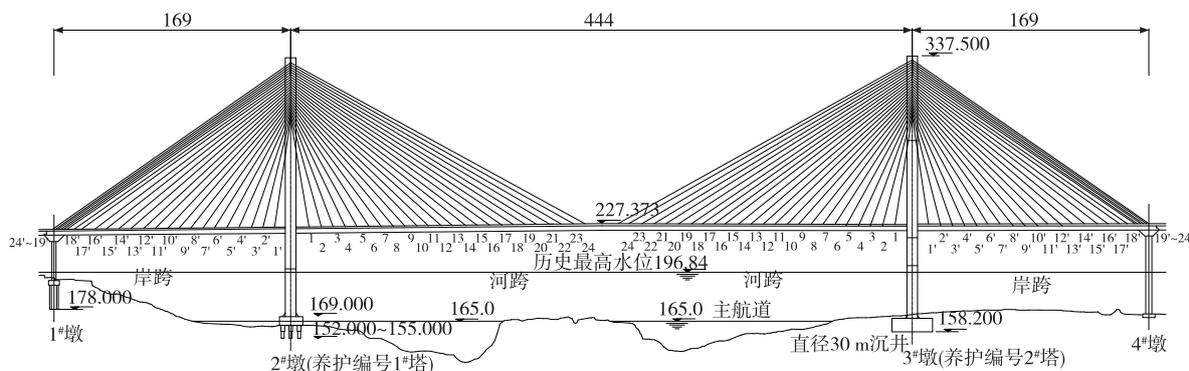


图1 某混凝土斜拉桥桥型布置示意图(单位:m)

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技项目(201427)

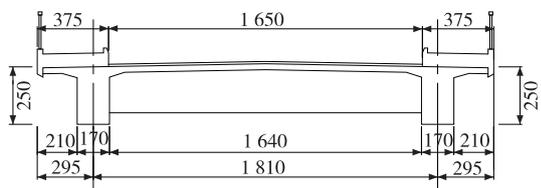


图 2 某混凝土斜拉桥主梁横断面示意图(单位:cm)

重的 8 根斜拉索进行开仓检查,结果显示拉索存在 PE(聚乙烯)防护层老化、钢丝锈蚀泛黄、钢丝局部锈坑等病害。随后对病害较严重的上游 1# 塔 15# 索、2# 塔 17# 索进行更换,并对更换下来的 2 根拉索进行力学性能及材料参数检测。检测结果显示:拉索上下锚头、钢丝均有一定程度锈蚀;拉索 PE 防护层有一定程度损伤和破损,外层缠包的防腐带老化;整根拉索的抗拉性能、延伸性能有一定程度削弱,单根钢丝的抗扭转性能、抗疲劳性能、镀锌层防腐效果非常差,已不满足规范要求。

2 拉索索力评估

2.1 基本评估值

拉索索力评估一般以设计索力为基准值 X_0 ,当实测索力 X_i 为基准值时,索力评分为 100;当实测索力相对于基准值的变化对结构产生的影响达到某一程度时,索力评分为 5^[3]。这个“程度”可根据不同需求、标准确定,考虑到许多专家学者对最低索力评分是以某一固定值来定义的,规定实测索力偏离基准值 $\pm 40\%$ 及以上时评分为 5。以适度指标模型线性插值计算索力评估值,公式如下:

$$y_i = \begin{cases} 100 \left(\frac{x_i - 0.6x_{i0}}{0.4x_{i0}} \right), & 0.6x_{i0} < x_i \leq x_{i0} \\ 100 \left(\frac{1.4x_{i0} - x_i}{0.4x_{i0}} \right), & x_{i0} < x_i < 1.4x_{i0} \\ 5, & x_i \leq 0.6x_{i0} \text{ 或 } x_i \geq 1.4x_{i0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: y_i 为拉索 i 的评估值; x_i 为拉索 i 的实测索

力值; x_{i0} 为拉索 i 的索力标准值。

索力评估流程见图 3。

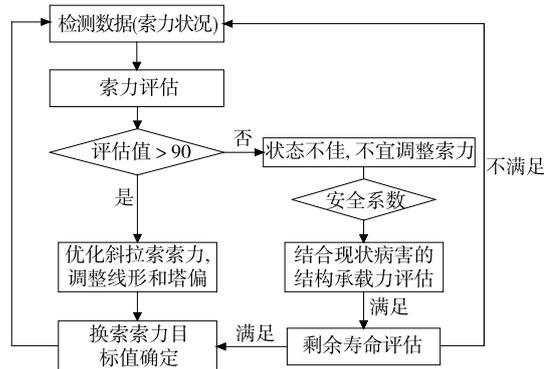


图 3 拉索索力评估流程

2.2 索力检测结果和索力评估

换索前,对该桥 2017 年实测索力与成桥索力进行对比,结果如下:1) 主桥上下游各根拉索的实测索力与成桥目标索力存在偏差,其中上游侧拉索索力偏差为 $-539 \sim 494$ kN,最大正偏差为 16.4%,最大负偏差为 -11.3% ;下游侧拉索索力偏差为 $-1336 \sim 849$ kN,最大正偏差为 24.0%,最大负偏差为 -22.1% 。2) 全桥索力偏差大于 20% 的拉索有 5 根,均为下游侧拉索,其中 1# 塔 23# 索、2# 塔 2# 索、7# 索、16# 索的相对偏差分别为 -22.1% 、23.5%、20.0%、21.2%,2# 塔 2# 索的相对偏差为 24.0%;其余拉索的相对偏差均在 $\pm 20\%$ 以内。

选取原设计成桥索力为标准索力值,采用适度指标模型按线性插值计算索力评估值。2017 年索力评估值见图 4、图 5。

由图 4 和图 5 可知:大部分拉索的基本评估值较低,与成桥索力相比变化较大,最大索力偏差为 24.0%。基本评估值在 90 以上的拉索有 61 根,占 31.1%;基本评估值为 80~90 的有 80 根,占 40.8%;基本评估值为 70~80 的有 46 根,占 23.5%;基本评

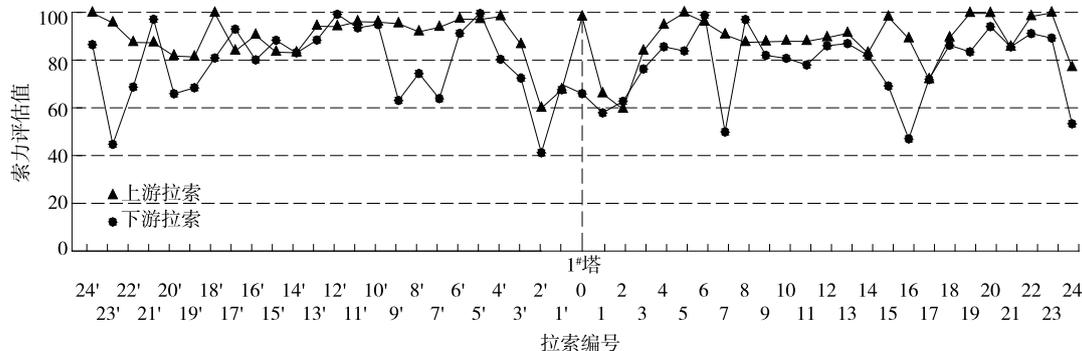


图 4 1# 塔斜拉索单索索力评估值

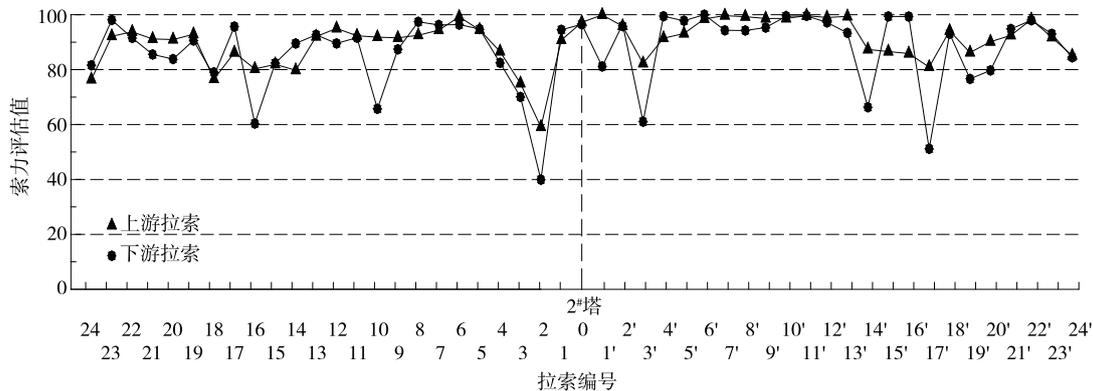


图 5 2#塔斜拉索单索索力评估值

估值在 70 以下的有 9 根,占 4.6%。全桥 196 根拉索中,评估值在 90 以下的有 135 根,占 68.9%,拉索索力基本评估值整体偏低,只有 1/3 的拉索满足索力优化条件,全桥索力偏离成桥索力状况明显,结构状态不佳,不宜大范围调整索力。

3 换索设计

3.1 换索设计

斜拉桥的换索设计除需考虑基本要求外,还需考虑施工和监控的可行性。换索设计思路:不改变结构的现状受力状态,将原斜拉索用新的斜拉索一一替换;以桥塔为中心,依次对称进行拉索更换,换索过程中保证主梁及主塔受力均衡,避免出现索力集中或过大的情况,确保换索的顺利进行和换索过程的安全^[4-5];采用强度等代替换原则,保持斜拉索应力水平基本一致;选取合适的拉索规格;采用梁上为固定端锚具、塔上为张拉端锚具的冷铸锚。

采用与原设计具有相同强度安全值的拉索,同时采用最新的拉索防护体系,增强其耐久性。预埋 $\phi 377$ mm、 $\phi 351$ mm、 $\phi 299$ mm、 $\phi 273$ mm 钢管,对应锚垫钢板预留孔径分别为 350 mm、310 mm、270 mm、240 mm,并据此确定锚杯外径。

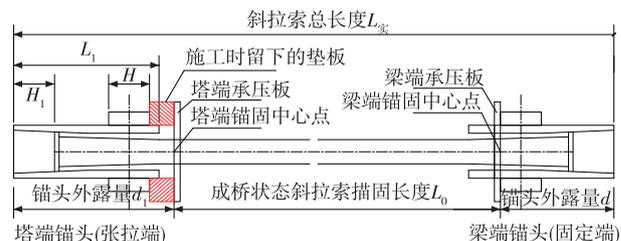
目前常用的斜拉索有平行钢绞线拉索和平行钢丝拉索,两种拉索在加工制作、运输、安装、受力性能、防护性能、维护更换等方面各有优缺点。通过综合比较,该桥采用平行钢丝拉索。由于原设计使用的拉索锚头尺寸比规范中锚头尺寸小,原设计预留的锚垫钢板孔径偏小。换索采用的平行钢丝拉索型号与规范匹配,为了使新索锚头顺利通过原设计锚垫钢板圆孔,新索锚头尺寸仍按原设计尺寸进行设计^[6-7]。

为保证梁、塔上锚具箱和锚具之间传力可靠,螺

母承压面与拉索中心线垂直及锚杯对中,采用尼龙垫圈。

3.2 斜拉索长度确定

按竣工时成桥索力计算拉索下料长度。根据塔端锚头外露量检测结果,该桥存在拉索锚固位置不合理的现象,表现在:部分拉索外露量比标准外露量大;个别拉索锚固螺母位置进入锚杯内螺纹退刀槽断面或旋出锚杯外螺纹(见图 6)。



L_1 为实际锚头外露量; H_1 为锚杯内螺纹深度; H 为锚圈高度

图 6 现场拉索锚固情况

拉索生产厂家提供的实际成品索长度 $L_{实}$ 为:

$$L_{实} = d_1 + L_0 + d$$

$$L_{新} = \left(\frac{L_1 - H_1}{2} + H_1 + \frac{H}{2} \right) + L_0 + d$$

$$L_{新} = L_{实} + \left(\frac{L_1 + H_1 + H}{2} \right) - d_1$$

式中: d_1 为实际锚头外露量(含垫板高度); d 为垫板厚度; $L_{新}$ 为新制成品索长度。

需要测量的数据只有实际锚头外露量 d_1 和 L_1 ,其他均为冷铸锚头的固定尺寸。

根据拉索塔端锚头实际外露量测量结果,1#(1'#)~14#(14'#)索的外露量基本正常,15#(15'#)~24#(24'#)索两边跨的外露量普遍偏大。因此,参考原索长,考虑两端的外露量对拉索长度进行修正,最大修正量为 238 mm(增大),最小修

正量为 -419 mm (减小),确保锚圈中心在锚杯的 $1/3$ 处。

3.3 换索顺序

拉索更换过程必然对过桥交通带来限制和影响。确定拉索更换程序的原则是在确保结构安全的前提下,力求施工周期最短、施工过程对过桥交通限制最小。

基于上述原则,在试算的基础上,采用上游或下游索塔两侧对称逐对替换的换索方法,换索过程为 $1^{\#}$ 塔 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$)索 $\rightarrow 2^{\#}$ 塔 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$)索 $\rightarrow \dots \rightarrow 1^{\#}$ 塔 $22^{\#}$ ($22'^{\#}$)索 $\rightarrow 2^{\#}$ 塔 $22^{\#}$ ($22'^{\#}$)索 $\rightarrow 1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $21^{\#}$ ($21'^{\#}$)索 $\rightarrow 1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $20^{\#}$ ($20'^{\#}$)索 $\rightarrow \dots \rightarrow 1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $1^{\#}$ ($1'^{\#}$)索 $\rightarrow 1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $0^{\#}$ 索,即 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$) $\sim 22^{\#}$ ($22'^{\#}$)索每次更换同一塔柱上主、边跨 2 根拉索, $21^{\#}$ ($21'^{\#}$) $\sim 1^{\#}$ ($1'^{\#}$)索每次更换 2 个塔的另一索号拉索。

4 换索过程计算分析

为确保换索过程的安全,拉索更换中一般采取封闭交通的管控措施^[8]。考虑到该桥换索过程中需要正常通行两岸小车和公交车,对换索全过程进行有限元仿真,分析换索过程中最大通行能力,确保换索过程中结构安全。建立图 7 所示分析模型,对换索过程进行仿真分析。

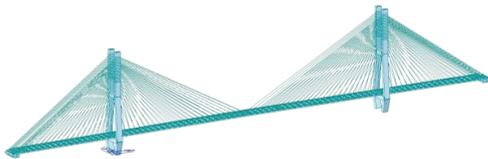


图 7 斜拉桥结构离散模型

4.1 主梁应力分析

主要计算工况如下:工况一为同时拆 $1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$)索;工况二为只拆单塔柱 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$)索;工况三为同时拆 $1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $21^{\#}$ ($21'^{\#}$)索。各工况下主梁受力见表 1。

表 1 换索过程中最不利工况下主梁受力

工况编号	跨中区域边梁应力/MPa	跨中区域横梁应力/MPa	跨中区域主梁变形/mm
工况一	3.04	—	242
工况二	-1.41	-0.82	115
工况三	-3.08	-0.58	184

注:表中数据为最不利位置的应力或变形数据;应力以受拉为“+”,受压为“-”,变形以向下为正,下同。

由表 1 可知:同时拆除 $1^{\#}$ 塔、 $2^{\#}$ 塔 $24^{\#}$ ($24'^{\#}$)索时,主跨主梁跨中控制断面应力为 3.04 MPa ,超过设计容许范围,卸索后应力超限应为首要考虑的问题^[9-10]。为此, $24^{\#}$ ($24'^{\#}$) $\sim 22^{\#}$ ($22'^{\#}$)索一次换索循环只更换 1 个塔柱的拉索, $21^{\#}$ ($21'^{\#}$) $\sim 1^{\#}$ ($1'^{\#}$)索一次换索循环更换 2 个塔柱同一索号的拉索,确保跨中区域的换索间距在 3 个索号以上。

4.2 索力变化分析

换索过程中最不利工况下索力变化见表 2。卸除拉索后,当前节段的主梁恒载由附近拉索承担,邻近拉索的索力增大,主梁下挠变;索力重分布后达到一个新的平衡状态,主塔因索力重分布发生偏位变形,使主梁线形的影响波及全桥。从拆除拉索后索力增量来看,邻索索力变化大于 5% 的影响区域有 10 根左右(单侧有 5 根)。对比 2 个主塔换索前索

表 2 换索过程中最不利工况下索力变化

位置	索号	换索前索力/kN	单拆 $24^{\#}$ 索时索力变化/%		单拆 $22^{\#}$ 索时索力变化/%		拆除 $21^{\#}$ 索时索力变化/%
			拆 $1^{\#}$ 塔	拆 $2^{\#}$ 塔	拆 $1^{\#}$ 塔	拆 $2^{\#}$ 塔	
1 [#] 塔中跨	16 [#]	4 906	1.7	1.7	3.9	0.8	6.1
	17 [#]	3 597	3.0	3.2	6.7	1.6	10.4
	18 [#]	4 608	2.9	3.3	6.3	1.8	9.7
	19 [#]	4 076	4.4	5.2	9.1	3.0	14.1
	20 [#]	4 839	4.3	5.3	8.5	3.3	13.0
	21 [#]	5 348	4.4	5.6	8.1	3.7	—
	22 [#]	5 096	4.9	6.7	—	4.7	12.5
	23 [#]	5 469	5.6	8.1	8.1	6.1	12.9
	24 [#]	4 075	—	11.2	8.8	9.3	16.0

续表2

位置	索号	换索前索力/ kN	单拆 24 [#] 索时索力变化/%		单拆 22 [#] 索时索力变化/%		拆除 21 [#] 索时索力 变化/%
			拆 1 [#] 塔	拆 2 [#] 塔	拆 1 [#] 塔	拆 2 [#] 塔	
	24 [#]	5 655	6.5	—	6.4	6.0	11.5
	23 [#]	5 125	6.8	9.9	6.2	8.3	13.7
	22 [#]	5 136	5.2	7.9	4.5	—	12.3
	21 [#]	5 199	4.5	7.1	3.7	8.1	—
2 [#] 塔中跨	20 [#]	4 687	4.2	6.9	3.3	8.6	13.2
	19 [#]	4 929	3.3	5.6	2.4	7.5	11.4
	18 [#]	4 386	2.6	4.6	1.8	6.5	10.0
	17 [#]	4 666	1.9	3.4	1.2	5.1	7.8
	16 [#]	3 922	1.6	3.0	1.0	4.9	7.5

力,可知卸索工况的邻索索力增加还与卸索数量及卸索索力大小有关。

5 斜拉桥结构敏感性分析

由于缺乏实际施工过程资料和竣工资料等,主梁和主塔的实际应力分布无法确切计算。施工过程中需考虑临时荷载和活载的作用,进行结构受力分析时需重点考虑临时荷载和限载交通通行的影响。

对在役桥梁进行合理的限载通行,可以有效提

高结构安全性能,减少安全隐患。制定限载通行标准时需考虑在役桥梁的实际受力状态和实际运营中汽车荷载对结构的影响。汽车荷载效应由车辆荷载及车辆轴重等共同决定,作用位置是不确定的随机变量。此外,拆除拉索的过程中有汽车吊和施工吊篮等临时荷载,临时荷载取 300 kN,施工吊篮荷载取 150 kN,作用在拆索指定位置。计算活载影响时需综合叠加活载效应。换索过程中最不利拆索工况及活载效应下梁底应力见表 3。

表 3 换索过程中最不利拆索工况及活载效应下梁底应力

单位:MPa

工况	不同汽车荷载等级下梁底应力			
	汽-15	汽-10	汽-6	
单塔拆除 24 [#] (24' [#]) 索	车道荷载+450 kN 临时荷载	0.15	-0.33	-0.83
	公交车车道荷载(变量)	0.91	0.91	0.91
	合计	1.06	0.58	0.08
单塔拆除 22 [#] (22' [#]) 索	车道荷载+450 kN 临时荷载	-0.85	-1.56	-2.04
	公交车车道荷载(变量)	0.86	0.86	0.86
	合计	0.01	-0.7	-1.18
双塔拆除 21 [#] (21' [#]) 索	车道荷载+450 kN 临时荷载	-2.45	-3.12	-3.74
	公交车车道荷载(变量)	0.83	0.83	0.83
	合计	-1.62	-2.29	-2.91
双塔拆除 1 [#] (1' [#]) 索	车道荷载+450 kN 临时荷载	-1.07	-1.36	-1.42
	公交车车道荷载(变量)	0.81	0.81	0.81
	合计	-0.26	-0.55	-0.61
双塔拆除 0 [#] 索	车道荷载+450 kN 临时荷载	4.45	4.25	4.03
	公交车车道荷载(变量)	1.31	1.31	1.31
	合计	5.76	5.56	5.34

从表 3 可以得出:1) 拆除下游侧 24[#] (24'[#]) 索的过程中,上游侧车道开放,上游侧跨中断面主梁下缘有一定余量的压应力储备;在车道荷载+450 kN 临时荷载+公交车车道荷载组合作用下,下游侧跨中断面主梁下缘出现拉应力,其中以汽-6 车道荷载控制时拉应力最小,为 0.08 MPa。2) 拆索过程中,最不利情况为拆除 0[#] 索,0[#] 索处的梁底出现较大拉应力,在汽-15 和 450 kN 施工临时荷载作用下,梁底出现 4.45 MPa 拉应力。故建议拆除 0[#] 索的过程中采取措施(如设置临时支座)防止梁底开裂。

6 结语

根据换索过程中主梁应力和索力的变化,结合该桥现状索力检测结果,该桥换索设计要点如下:

(1) 斜拉索索力基本评估值偏低,索力均匀性不佳,不宜对索力进行调整。采用强度等代替换原则进行换索设计,保持斜拉索应力水平基本一致。

(2) 根据旧索锚头外露量对新索的下料长度进行修正,以免出现外露量偏大及螺母位置进入锚杯内螺纹退刀槽断面或旋出锚杯外螺纹的现象。

(3) 对换索方案进行全过程有限元仿真分析,确保斜拉桥结构安全。严格控制换索顺序,24[#] (24'[#])~22[#] (22'[#]) 索为单塔柱更换,21[#] (21'[#])~1[#] (1'[#]) 索为双塔柱同时更换,保证换索间距在 3 个索号以上。

(4) 更换 24[#] (24'[#])~22[#] (22'[#]) 索的过程中,限载 6 t,严格控制超重车。更换 21[#] (21'[#])~

1[#] (1'[#]) 索的过程中,在限载 6 t 的条件下,有控制地允许通行公共汽车,公交车间距控制在 15 m 以上。

参考文献:

- [1] 袁和旭.混凝土斜拉桥换索设计方法研究[J].工程技术研究,2024,9(2):202-204.
- [2] 过黄喜.钢-混凝土混合梁三塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].公路与汽运,2022(4):86-88+138.
- [3] 马忠才.斜拉桥拉索体系性能综合评估及换索施工监控方法研究[D].天津:天津大学,2017.
- [4] 沈平,严先荣.天津永和大桥斜拉索换索方法分析[J].公路交通科技(应用技术版),2011,7(4):47-51.
- [5] 蒋伟冬.地锚式混凝土斜拉桥换索结构分析及施工工艺研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [6] 郑孝强,董世楚,黄光,等.大跨径高低塔斜拉桥换索施工关键技术研究[J].西南公路,2022(1):59-62.
- [7] 徐淑亮.超长服役期钢斜拉桥换索关键技术研究[J].铁道建筑技术,2023(6):141-145.
- [8] 康孝先,周子豪,白智勇,等.斜拉桥拉索病害分析及换索关键技术研究[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十届学术年会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2020:289-295.
- [9] 齐东春,王宇飞,李琦,等.基于联合静动力修正模型的斜拉桥换索方案[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(11):1-8.
- [10] 晏国泰,张方杰,窦昕玥.鹤洞大桥斜拉索更换施工关键技术[J].世界桥梁,2023,51(1):108-114.

收稿日期:2024-02-20

(上接第 107 页)

- [4] 陈金盛.多跨连续刚构桥合龙顶推力计算及分析控制[J].公路,2019,64(2):121-124.
- [5] 铁木尔.长边跨高墩大跨连续刚构桥施工方案比较[J].中外公路,2019,39(5):127-131.
- [6] 薛君,薛飞,马宏宇,等.大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙精细化分析与应变控制[J].公路与汽运,2022(2):110-113.
- [7] 黄文洁,田仲初,薛飞,等.边中跨同时合龙对高墩大跨连续刚构桥性能影响分析[J].公路与汽运,2020(2):111-114.

- [8] 陈词.连续刚构桥边跨和中跨同时合龙施工技术探讨[J].四川建材,2019,45(6):125-126.
- [9] 解亚东,王少辉,吕志强,等.多跨连续刚构桥边中跨同时合龙关键技术[J].中外公路,2021,41(5):85-89.
- [10] 杨庆国,唐瑞.非常规合拢顺序对连续刚构桥影响分析[J].公路工程,2015,40(1):133-136.
- [11] 何斌.大跨连续刚构桥空间稳定性分析及程序设计[D].南宁:广西大学,2008.

收稿日期:2023-05-05