

# 大跨悬索桥吊索更换技术及受力状态模拟分析

余章龙<sup>1</sup>, 张大长<sup>1</sup>, 张宇峰<sup>2</sup>, 孙震<sup>2</sup>

(1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2.江苏省交通科学研究院)

**摘要:**为研究桥梁吊索更换技术,以某大跨悬索桥病害较严重的吊索为背景工程,首先选取桥梁下游19#吊索为研究对象,比选不同的吊索更换方法,选取临时吊索法作为桥梁吊索更换方法;然后基于临时吊索法,采用有限元软件模拟分析吊索更换过程,对比分析了3种不同的吊索更换方案,探讨了各方案的结构受力状态。研究结果表明:基于该悬索桥吊索与耳板的连接为销接式,采用临时吊索法更换吊索;随着临时吊索数量的增加,临时吊索索力逐渐减小,各更换方案之间临时吊索索力降幅也在逐渐减小;五点更换方案临时吊索索力为200 t,更适合该桥吊索更换;桥梁吊索更换过程中,换索侧相邻吊索受吊索更换影响较大,非换索侧受吊索更换影响较小,可以忽略不计;该文提出的多点张拉临时吊索的更换方案,可以有效减小临时索力,避免索夹下滑。

**关键词:**大跨悬索桥;吊索更换技术;受力状态;临时吊索法

## 1 引言

近年来,随着中国交通事业的迅猛发展,修建了许多大跨度、特大跨度桥梁跨越峡谷、海峡、陆岛和大江大河。悬索桥是跨越能力最大的桥型之一,吊索作为悬索桥的主要传力结构,在不同环境中对于损伤最为敏感,易造成钢丝的腐蚀;车辆荷载、风荷载、雨振风振

等动力作用导致索体钢丝承受循环荷载作用而产生疲劳破坏。多座缆索系统桥梁因为各种原因而不得不提前换索,既影响了桥梁的使用又造成了巨大的经济损失。因此,吊索的寿命远小于桥梁结构的寿命。

2006年赵洋基于临时吊索法对某系杆拱桥吊索进行了更换,并提出不等步长张拉临时吊索的更换方案;2014年黄泽联基于临时兜吊法,采用有限元模拟分析吊索更换过程,得到系杆标高以及吊索索力的变

影响显著,说明主缆对结构刚度的贡献度很大。

(3)加劲梁抗弯刚度的增加能显著提升自锚式吊拉协作体系桥梁的总体刚度,这与地锚式吊拉协作体系桥存在明显差异,在设计中需要加大梁高以提高加劲梁的抗弯刚度。此外,钢梁与混凝土梁抗弯刚度影响不一致,说明自锚式悬索和斜拉两种体系在协作体系中既共同受力又具有独立性,荷载分配遵循刚度分配原则。

(4)对加劲梁设置一定拱度有助于提高结构的总体刚度,但提升效果有限。

## 参考文献:

[1] 许福友,张哲,黄才良,等.斜拉-悬吊协作体系桥工程应

用及特点分析[J].中外公路,2009(1).

[2] 周琳琳.自锚式悬索-斜拉组合体系桥合理成桥状态及参数分析[D].长安大学硕士学位论文,2015.

[3] 程伟,石坚,朱凌志.自锚式与地锚式悬索桥结构设计参数对比研究[J].上海公路,2010(3).

[4] 王甜.斜拉-悬吊协作体系桥梁设计关键问题研究[D].湖南大学硕士学位论文,2015.

[5] 周云岗,肖汝诚.多塔斜拉-悬吊协作桥活载效应近似计算方法[J].同济大学学报:自然科学版,2013(11).

[6] 王会利,秦泗凤,张哲,等.自锚式斜拉-悬索协作体系桥非线性分析[J].大连理工大学学报,2010(6).

[7] 包龙生,曹鑫,于玲,等.结构参数对钢-混组合桥塔自锚式悬索桥静力性能的影响研究[J].铁道标准设计,2014(5).

收稿日期:2018-06-27

基金项目:江苏交通控股有限公司项目(编号:GCKY2016-02)

作者简介:余章龙,男,硕士.E-mail:18761600330@163.com

化规律;2014 年王超伟利用 Midas 有限元软件模拟分析吊索更换过程,重点分析吊索更换过程中临吊体系的安全稳定性;2015 年王江鸿对汕头海湾大桥吊索进行了更换;美国福斯大桥由于吊索病害,也曾对全桥吊索进行了更换。

该文以某悬索桥为依托,基于该桥吊索出现的病害问题,进行长吊索更换技术研究。首先比对不同的吊索更换方法,提出适用于该桥吊索更换的方法;然后根据不同的吊索更换方案,基于有限元的模拟分析,选取适用于该桥吊索的更换方案。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

以中国某大跨悬索桥为工程实例。该桥于 1 999 年建成通车,运营至今已有 18 年。桥梁总长 3 071 m,其中主跨长 1 385 m,桥塔高 190 m,由钢筋混凝土空心结构与三道门式框架结构的横梁组成。锚碇为重力式锚碇。主梁采用流线形钢箱梁断面,钢箱梁宽度 36.9 m,高度 3 m,其中桥面宽 29.5 m,采用双向六车

道,两侧各设有宽 1.8 m 的检修通道。

为防止吊索钢丝出现病害,该桥吊索外部设有 PE 护套。但是由于吊索振动和恶劣环境的影响,PE 护套有所破坏,导致吊索内部钢丝锈蚀、破损。从 2001 年开始就发现吊索出现了病害并进行不同程度的修补,但是经过 16 年的运营,该桥吊索又产生了病害。

经检测发现桥梁下游 19# 吊索轻中度锈蚀。该吊索长 46.99 m,由 109 根直径 5 mm 的平行钢丝拉索组成。该桥吊索已服役 18 年,接近设计使用寿命,为累积吊索更换经验,决定更换下游 19# 吊索。

### 2.2 有限元模型建立

该桥桥塔采用 C50 混凝土,弹性模量为  $3.50 \times 10^4$  MPa,密度为  $2\ 600\text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.2;钢箱梁采用 16Mn 材质,弹性模量为  $2.10 \times 10^5$  MPa,密度为  $7\ 850\text{ kg/m}^3$ ,泊松比为 0.3;主梁与吊索之间采用虚拟刚臂进行连接,虚拟刚臂长度为上、下游吊索间距,有效截面积为  $0.1\text{ m}^2$ ,弹性模量和截面抗弯惯性矩为钢箱梁的 10 倍,泊松比为 0.1。虚拟刚臂只在主梁与吊索之间起到荷载传递的作用,对分析结果无影响。主缆及吊索相关参数如表 1 所示。

表 1 主缆及吊索相关参数

构件名称	弹性模量/ ( $\times 10^5\text{ MPa}$ )	泊松比	单根截面 面积/ $\text{mm}^2$	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	线膨胀系数/ ( $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )
中跨主缆	2.00	0.3	0.482 50	7 850	1.25
边跨主缆	2.00	0.3	0.505 00	7 850	1.25
长吊索	1.95	0.3	0.002 14	7 850	1.25
短吊索	1.46	0.3	0.001 97	7 850	1.25

利用有限元软件建立全桥模型,模拟分析吊索更换过程。为简化分析,将同一吊点的 2 根吊索简化成单根吊索,截面面积为原来吊索的 2 倍。桥梁主塔、钢箱梁采用三维空间线性梁单元 B31 进行模拟;主缆以及吊索采用三维桁架单元 T3D2 进行模拟。充分利用桥梁静载试验结果,尽可能真实模拟该桥的既有状态。恒载考虑主梁、主缆和吊索的自重;活荷载包括风荷载以及车道荷载,其中风荷载仅考虑主梁横桥向风力,根据当地大气养护手册,主梁横向风荷载设计风速为  $27.1\text{ m/s}$ ,参考 JTG D60—01—2004《公路桥梁抗风设计规范》,计算得到主梁横向风荷载为  $2.32\text{ kN/m}$ 。有限元模型如图 1 所示。

该桥作为国家公路的“咽喉”工程,日均车流量较大,吊索更换过程中封闭交通不符合实际要求。因此,在吊索更换过程中设计了 5 种不同的限载工况。工况

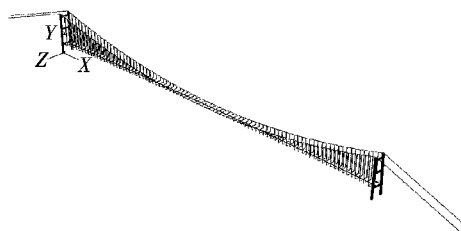


图 1 有限元计算模型

1:六车道公路—I级加载;工况 2:上游三车道采用汽车—超 20 级,下游三车道采用汽车—20 级;工况 3:上游三车道采用汽车—超 20 级,下游封闭最外侧车道,剩余车道采用汽车—20 级;工况 4:上游三车道采用汽车—超 20 级,下游封闭最外侧车道,剩余车道采用挂车—100 级;工况 5:上游三车道采用汽车—超 20 级,下游封闭最外侧车道,剩余车道采用挂车—80 级。

3 吊索更换方法研究

3.1 吊索更换方法比选

目前常用的吊索更换方法主要有临时支架法、临时兜吊法和临时吊索法。其共同原理就是采用临时替代系统,将待换吊索的索力转移到临时替代上,然后拆除旧吊索,安装新吊索,最后将临时替代上的索力转移到新吊索上。

(1) 临时支架法:在待换吊索下方横梁处设置钢支架,通过临时支架支撑横梁,在索力卸载后拆除旧吊索。该方法操作简单,对桥梁结构不产生过大影响,可以保证吊索更换过程中桥梁始终处于安全状态,适合单根吊索的更换。

(2) 临时兜吊法:将横梁用钢丝绳兜吊在桥梁拱肋上,然后对吊索钢丝进行分批切断,同时补张临时兜吊系统,来平衡切断钢丝的索力。循环往复,直至切断所有吊索钢丝。该方法操作简单,但是在切断钢丝的过程中,旧吊索索力减少量无法确定,因此该方法具有一定的风险。

(3) 临时吊索法:待换吊索旁安装临时吊装系统,通过分批张拉临时吊索,再分批切断旧吊索钢丝,最后安装新吊索。该方法不仅适用于单根吊索的更换,还可以进行全桥吊索的更换。

基于该桥吊索与耳板的连接方式为销接式,耳板留有备用销孔,因此可以采用临时吊索法更换吊索。在待换吊索旁安装临时吊装系统,临时吊索上部通过临时索夹与主缆连接,临时吊索下部通过销轴与耳板连接。

3.2 临时吊索法有限元模拟

该桥吊索更换采用临时吊索法,在下游 19<sup>#</sup> 吊索处安装临时吊装系统。通过张拉临时吊索,拆卸旧吊索。这个过程可以等效为在待换吊索两端施加一对相向荷载,如图 2 所示。

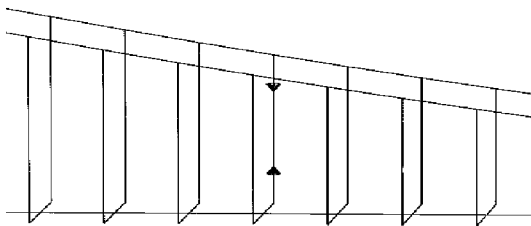


图 2 单点更换方案有限元模拟

根据临时吊索数量的不同,该桥吊索更换可分为

单点更换方案、三点更换方案以及五点更换方案。单点更换方案:即在 19<sup>#</sup> 吊索处张拉临时吊索;三点更换方案:即在 18<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>、20<sup>#</sup> 吊索处同时张拉临时吊索;五点更换方案:即在 17<sup>#</sup>、18<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>、20<sup>#</sup>、21<sup>#</sup> 吊索处同时张拉临时吊索。

4 吊索更换方案比较分析

4.1 单点更换方案

单点更换方案是在 19<sup>#</sup> 吊索处安装临时吊装系统,通过张拉临时吊索,拆卸旧吊索。有限元模拟如图 2 所示。

根据 5 种限载工况,计算得到各工况下临时吊索索力值如表 2 所示。

表 2 各工况下临时吊索的索力值

工况	索力/kN	工况	索力/kN
1	3 630	4	3 635
2	3 375	5	3 525
3	3 275		

由表 2 可知:工况 4 临时吊索索力最大,最大临时吊索索力为 3 635 t。吊索更换过程中,理论上原吊索索力等于临时吊索张拉力,但实际上临时吊索张拉力远远大于原来旧吊索索力。这主要跟桥梁整体刚度和吊索更换方法有关,桥梁整体刚度越大,吊索更换过程中临时索力传递效率越低;同时,不同的吊索更换方法具有不同的荷载传递效率。

4.1.1 吊索索力变化

换索侧吊索索力变化规律如图 3 所示。在单点张拉临时吊索直至 19<sup>#</sup> 吊索索力为 0 的过程中,由于桥面纵向刚度的影响,临时吊索索力被分配到同侧相邻吊索上。其中,18<sup>#</sup> 和 20<sup>#</sup> 吊索分配的临时吊索索力最大,距离临时吊索越远,各吊索分配到的临时索力越小,15<sup>#</sup> 和 23<sup>#</sup> 区间外吊索索力基本无变化。非换索侧吊索索力变化规律如图 4 所示,在对下游进行吊索更换时,上游吊索索力基本无变化,说明在更换桥梁一侧吊索时,对异侧吊索索力影响较小,可忽略不计。

4.1.2 主缆与主梁竖向位移变化

主缆与主梁的位移变化规律如表 3 所示。在吊索更换时,临时吊索处主缆与主梁竖向位移变化较大,其中主缆下降 67.32 mm,主梁抬升 47.68 mm,19<sup>#</sup> 吊索上、下锚点间距缩短了 110 mm。在张拉临时吊索过程中,由于桥面刚度以及整体性的影响,临时吊索两侧

18<sup>#</sup>和20<sup>#</sup>吊索处主梁与主缆位移变化较大,距离临时吊索越远,主缆与主梁位移变化越小。非换索侧主缆与主梁位移变化很小,说明在一侧更换吊索时,不会对异侧主缆与主梁产生明显影响。

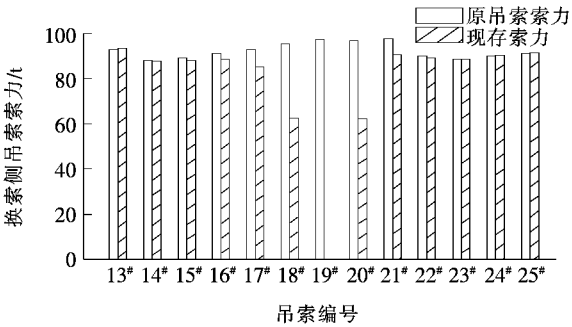


图 3 换索侧索力

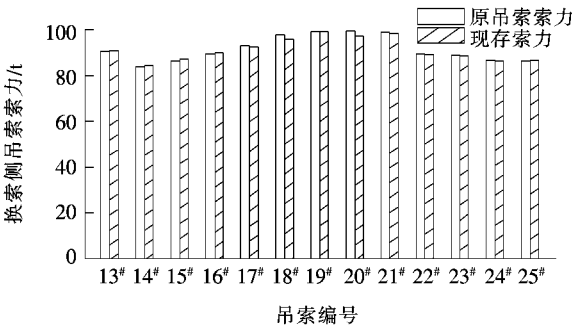


图 4 非换索侧索力

表 3 主梁与主缆位移变化值

吊索编号	换索侧/mm		非换索侧/mm	
	主梁位移	主缆位移	主梁位移	主缆位移
13 <sup>#</sup>	-2.83	-2.44	-2.05	-1.38
14 <sup>#</sup>	-2.21	-1.95	-1.45	-0.55
15 <sup>#</sup>	-0.61	-1.21	-0.02	0.98
16 <sup>#</sup>	2.57	-1.19	2.69	3.30
17 <sup>#</sup>	8.18	-3.67	6.81	6.13
18 <sup>#</sup>	15.71	-21.55	10.82	8.18
19 <sup>#</sup>	47.68	-62.32	7.06	8.02
20 <sup>#</sup>	14.76	-19.24	10.66	8.25
21 <sup>#</sup>	7.69	-1.27	6.55	6.07
22 <sup>#</sup>	2.80	0.57	2.50	3.06
23 <sup>#</sup>	0.20	0.20	0	0.70
24 <sup>#</sup>	-1.00	-0.70	-1.20	-0.70
25 <sup>#</sup>	-1.20	-1.10	-1.80	-1.50

注:负值表示下降,正值表示抬升。

4.2 三点更换方案

三点更换方案是在18<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>和20<sup>#</sup>吊索处张拉临

时吊索。有限元模拟就是在18<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>和20<sup>#</sup>吊索两端各施加一对相向荷载。各工况下临时吊索的索力值如表4所示。

表 4 各工况下临时吊索的索力值

工况	索力/kN		
	18 <sup>#</sup>	19 <sup>#</sup>	20 <sup>#</sup>
1	2 205	2 205	2 205
2	2 050	2 050	2 050
3	1 995	1 995	1 995
4	2 220	2 220	2 220
5	2 150	2 150	2 150

由表4可知:工况4临时吊索索力最大,最大临时吊索索力为2 220 kN。三点更换方案与单点更换方案相比,临时吊索索力减少1 415 kN,索力降幅达到原来单点更换方案临时吊索索力的38.9%。

4.2.1 吊索索力变化

由前述单点更换方案可以发现:在该桥一侧进行吊索更换时,对异侧吊索索力影响较小,可以忽略不计,因此这里只列出换索侧吊索索力,如图5所示。由于临时吊索数量的增加,更多的临时吊索索力被分配到同侧相邻吊索上,16<sup>#</sup>~21<sup>#</sup>区间内吊索索力有所变化,索力影响区域相比单点更换方案有所增加,并且距离临时吊索越远,吊索索力变化越小,16<sup>#</sup>到21<sup>#</sup>区间外吊索索力不受影响。

4.2.2 主缆与主梁竖向位移变化

由前述单点更换方案可以发现:在该桥一侧进行吊索更换时,对异侧主缆与主梁影响较小,可以忽略不计。因此,三点更换方案只列出换索侧主缆与主梁位移变化,如表5所示。19<sup>#</sup>临时吊索处主缆与主梁竖向位移变化最大,主缆下降62.67 mm,主梁抬升47.37 mm,上、下锚点间距缩短了110.04 mm,距离临时吊索越远,主缆与主梁位移变化越小。

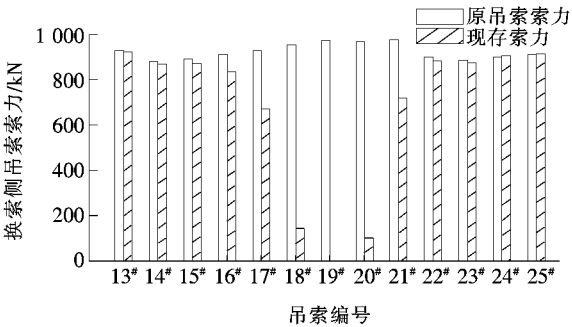


图 5 换索侧索力

表 5 换索侧主梁与主缆位移变化值

吊索 编号	位移变化值/mm		吊索 编号	位移变化值/mm	
	主梁	主缆		主梁	主缆
13 <sup>#</sup>	-4.83	-4.28	20 <sup>#</sup>	41.37	-49.01
14 <sup>#</sup>	-3.32	-3.42	21 <sup>#</sup>	14.44	-11.35
15 <sup>#</sup>	0.12	-2.77	22 <sup>#</sup>	5.90	-0.24
16 <sup>#</sup>	6.62	-4.08	23 <sup>#</sup>	0.80	-0.10
17 <sup>#</sup>	16.78	-17.00	24 <sup>#</sup>	-1.60	-1.30
18 <sup>#</sup>	44.47	-54.56	25 <sup>#</sup>	-2.30	-2.10
19 <sup>#</sup>	47.37	-62.67			

注:负值表示下降,正值表示抬升。

4.3 五点更换方案

五点更换方案是在 17<sup>#</sup>、18<sup>#</sup>、19<sup>#</sup>、20<sup>#</sup> 和 21<sup>#</sup> 吊索处张拉临时吊索。有限元模拟方法是在 5 根吊索两端各施加一对相向荷载。各工况下临时吊索索力值如表 6 所示。

表 6 各工况下临时吊索的索力值

工况	索力/kN				
	17 <sup>#</sup>	18 <sup>#</sup>	19 <sup>#</sup>	20 <sup>#</sup>	21 <sup>#</sup>
1	1 980	1 980	1 980	1 980	1 980
2	1 845	1 845	1 845	1 845	1 845
3	1 795	1 795	1 795	1 795	1 795
4	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
5	1 940	1 940	1 940	1 940	1 940

由表 6 可知:工况 4 临时吊索索力最大,最大临时吊索索力为 2 000 kN。五点更换方案与单点更换方案相比,最大临时吊索索力减少了 1 635 kN,索力降幅达到单点更换方案临时吊索索力的 44.98%。五点更换方案与三点更换方案相比,临时吊索索力减少 220 kN,索力降幅并不明显。

4.3.1 吊索索力变化

更换前后吊索索力变化规律如图 6 所示。由于临时吊索数量的增加,索力影响区域明显增大,14<sup>#</sup>~24<sup>#</sup> 区间内吊索索力受吊索更换影响较大,并且距离临时吊索越远,索力影响越小,14<sup>#</sup>~24<sup>#</sup> 区间外吊索索力基本不受影响。

4.3.2 主缆与主梁竖向位移变化

主梁与主缆位移变化规律如表 7 所示。19<sup>#</sup> 临时吊索处主缆与主梁位移变化最大,主缆下降 59.12 mm,主梁抬升 50.98 mm,上、下锚点间距缩短了110.1 mm,距离临时吊索越远,主缆与主梁位移变化越小。

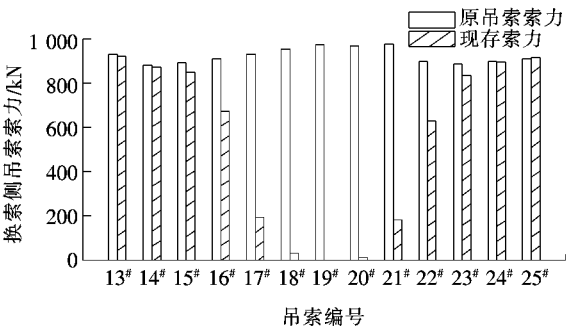


图 6 换索侧索力

表 7 换索侧主梁与主缆位移变化值

吊索 编号	位移变化值/mm		吊索 编号	位移变化值/mm	
	主梁	主缆		主梁	主缆
13 <sup>#</sup>	-5.92	-5.93	20 <sup>#</sup>	45.67	-54.00
14 <sup>#</sup>	-2.54	-5.33	21 <sup>#</sup>	36.02	-41.27
15 <sup>#</sup>	4.19	-6.51	22 <sup>#</sup>	10.80	-9.78
16 <sup>#</sup>	15.17	-18.34	23 <sup>#</sup>	2.90	-1.40
17 <sup>#</sup>	43.45	-53.00	24 <sup>#</sup>	-1.40	-1.90
18 <sup>#</sup>	50.59	-61.88	25 <sup>#</sup>	-3.10	-2.90
19 <sup>#</sup>	50.58	-59.12			

注:负值表示下降,正值表示抬升。

5 吊索更换方案校核

单点、三点和五点更换方案最大临时吊索索力分别为3 635、2 220和2 000 kN。随着临时吊索数量的增加,临时吊索索力逐渐减小。三点更换方案与单点更换方案相比,临时吊索索力减小了 38.9%,索力降幅明显。但是五点更换方案与三点更换方案相比,临时吊索索力仅减少了 9.9%,索力降幅不明显。这说明,随着临时吊索数量的增加,各方案之间临时吊索索力降幅逐渐减小。

该桥吊索更换采用临时吊索法,吊索更换必须要满足一定的条件。首先要保证吊索上、下锚点间距缩短量必须大于吊索在对应工况下的最大伸长量,才能拆卸旧吊索。其次,由于临时吊索索力的增加,索夹与主缆之间容易产生滑移。因此有必要对上述更换方案进行校核。

5.1 上、下锚点间距缩短量校核

该桥 19<sup>#</sup> 吊索长度为 47 m,截面面积为 2 140 mm<sup>2</sup>,弹性模量为 2×10<sup>5</sup> MPa,单根吊索最大索力为 950 kN,根据吊索材料以及截面特性可以计算出吊索

最大拉伸量为 104.3 mm。3 种吊索更换方案上、下锚点间距缩短量均大于该值,所以 3 种更换方案均满足拆卸旧吊索的要求。

## 5.2 索夹下滑力校核

根据设计规范要求,索夹与主缆之间必须保证一定的抗滑移安全系数,以防止索夹下滑。该桥吊索索夹抗滑移安全系数取值为 3,17<sup>#</sup>~21<sup>#</sup> 区间内吊索索夹上有 8 颗高强螺栓,单颗螺栓的设计预紧力为 500 kN,各吊索索夹与主缆之间的夹角角度见表 8。不考虑临时索夹的抗滑移性能,仅在原永久索夹下,索夹抗滑移安全系数按照公式  $K_{fc} = F_{fc} / N_c \geq 3$  进行计算。其中,  $N_c = N_h \cdot \sin\varphi$ ,  $F_{fc} = k \cdot u \cdot P_{tot}$ 。式中:  $K_{fc}$  为索夹抗滑移安全系数;  $N_c$  为主缆上索夹的下滑力(N);  $N_h$  为吊索拉力(N);  $\varphi$  为索夹在主缆上的安装倾角;  $F_{fc}$  为索夹抗滑摩阻力(N);  $k$  为紧固压力分布不均匀系数,取 2.8;  $u$  为摩擦系数,取 0.15。计算结果如表 8 所示。

表 8 索夹抗滑验算

更换方案	吊索编号	索夹角度/(°)	下滑力/kN	抗滑摩阻力/kN	抗滑安全系数
单点	19 <sup>#</sup>	12.1	760	1 680	2.2
	18 <sup>#</sup>	12.6	481	1 680	3.5
三点	19 <sup>#</sup>	12.1	462	1 680	3.6
	20 <sup>#</sup>	11.6	443	1 680	3.8
	17 <sup>#</sup>	13.1	449	1 680	3.7
	18 <sup>#</sup>	12.6	432	1 680	3.9
五点	19 <sup>#</sup>	12.1	415	1 680	4.0
	20 <sup>#</sup>	11.6	398	1 680	4.2
	21 <sup>#</sup>	11.2	385	1 680	4.4

单点更换方案索夹抗滑移安全系数为 2.2,小于规范规定的索夹抗滑移安全系数 3,不满足规范规定的要求。三点和五点更换方案索夹抗滑移安全系数均大于 3,满足规范规定的要求。

从上面分析可以看出:多点张拉临时吊索的更换方案,可以有效减小临时吊索索力,避免索夹下滑。显然,从安全角度出发,应该采用临时吊索索力小的更换方案,因此,可认为五点更换方案更适合于该桥吊索的更换。

## 6 结论

(1) 基于该悬索桥吊索与耳板的连接为销接式,采用临时吊索法更换吊索。

(2) 对比分析 3 种更换方案,发现随着临时吊索数量的增加,临时吊索索力逐渐减小,各方案之间临时吊索索力降幅也在逐渐减小。

(3) 五点更换方案临时吊索最大索力为 2 000 kN,相较于单点和三点更换方案,临时吊索索力各减少了 1 635 和 2 200 kN,从安全方面考虑,五点更换方案更适用于该桥吊索更换。

(4) 在吊索更换过程中,换索侧相邻吊索受吊索更换影响较大,非换索侧受吊索更换影响较小。

(5) 多点张拉临时吊索可以有效减小临时吊索索力,避免索夹下滑。

## 参考文献:

- [1] 汪锋. 江阴大桥吊索锈蚀分析[J]. 中国公路, 2012(22).
- [2] 龙跃, 等. 拱桥拉索病害研究与对策[J]. 桥梁建设, 2005(3).
- [3] 孙洪滨. 江阴大桥吊索典型病害及更换工艺[J]. 科技创新与应用, 2014(31).
- [4] 赵洋. 系杆拱桥吊杆更换研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2006.
- [5] 黄泽联. 杭州塘大桥吊杆更换施工控制研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 王超伟. 中下承式拱桥吊杆更换技术研究[D]. 山东大学硕士学位论文, 2014.
- [7] 王江鸿, 王修山, 阳春龙, 汕头海湾大桥试验吊索更换工程施工和监控[J]. 公路与汽运, 2015(6).
- [8] Clark C&Simpson A. Forth Road Bridge Replacement of Hangers[Z], Edingburg, 2010.
- [9] 石世赛. 钢管混凝土系杆拱桥吊杆更换技术研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2012.
- [10] 陈双聪. 拱桥吊杆更换若干关键问题研究[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2014.
- [11] 李乃强. 大跨中承式拱桥吊杆索力检测及更换研究[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2008.
- [12] 陈志敏, 吴运宏. 自锚式悬索桥吊杆索更换关键技术[J]. 世界桥梁, 2016(6).
- [13] 马文龙, 刘世忠, 王苍和, 等. 刘家峡大桥主缆空隙率及索夹抗滑移试验研究[J]. 世界桥梁, 2014(5).
- [14] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].