

三塔空间缆自锚式悬索桥体系转换研究

代百华^{1,2}, 朱金柱^{1,3}(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司;
3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室)

摘要:以目前国内外最大跨度的三塔空间缆自锚式悬索桥——济南凤凰路黄河大桥为研究背景,从传统两塔自锚式悬索桥体系转换特点进行分析,明确三塔自锚式悬索桥的两类吊索张拉方案(即先边后中和边中共进),且两类方案中跨吊索张拉起始位置只能从两塔往跨中推进,不宜从跨中往两塔方向进行。在此基础上,对吊索张拉方式以及空间缆的横向连接方式进行了比选探讨与计算分析,确立了“边中共进”方案1和“先边后中”方案3两种可行的典型方案,并对两种方案下各种参数进行对比分析,最终选择“先边后中”方案3为最佳体系转换方案。

关键词:三塔; 空间缆; 自锚式悬索桥; 体系转换; 横向偏差角

常规平面缆自锚式悬索桥体系转换方案需以考虑结构构件安全为原则,综合考虑其张拉工效、合理性和经济性,选择最优的吊索张拉方案。而空间缆自锚式悬索桥体系转换除了常规自锚式悬索桥体系转换所需考虑的要素,还需考虑如何解决吊索横向偏差角的问题。而解决吊索横向偏差角的方法除了结构设计优化(如奥克兰海湾大桥研发带凹槽索夹和柔性吊杆来适应施工过程和成桥后不同状态下吊杆的倾斜;天津富民桥采用了一种新型的可转动式索夹,适应 6° 偏差角,在吊杆产生横桥向位移时,通过索夹的转动释放对主缆产生的扭矩作用),还有设置临时拉索法(如杭州江东大桥,在中跨设置5对临时拉索)、横向对拉法(如张家界玻璃桥在跨中设置3道横向对拉装置)以及横向顶撑法(如东苕溪大桥在中跨设置3道横向顶撑装置)。

迄今为止,已建和在建的空间缆自锚式悬索桥有20余座,已有许多学者分别对单塔(如广州猎德大桥、天津富民桥等)、两塔空间缆(如韩国永宗大桥、哈尔滨阳明滩大桥)自锚式悬索桥体系转换方案进行过研究,而对于三塔空间缆自锚式悬索桥体系转换的研究则相对较少。该文以目前国内外最大跨度(主跨428 m)三塔空间缆自锚式悬索桥——济南凤凰路黄河大桥为依托背景,对其索梁体系转换进行相关的研究。

悬索桥,跨径布置为(70+168+428+428+168+70) m=1 332 m,如图1所示。主缆采用61-127 ϕ 6.2 mm镀锌铝合金高强钢丝组成,中跨设计矢跨比为1/6.15。成桥状态下散索鞍IP到道路中心线的横向距离为7.1 m,边中塔主索鞍IP点到道路中心线的横向距离为3.165 m,主缆中跨跨中点到道路中心线的横向距离为6.872 m。空缆状态下中跨跨中点到道路中心线的横向距离为3.27 m。左(右)中跨均设置44对永久吊索和3对临时吊索(中央扣处),从边塔往中塔方向依次编号为M1~M22、LD1~LD3、M23~M44;左(右)边跨均设置16对永久吊索,从边塔往散索鞍方向依次编号为S1~S16,其中S16、M20~M25均采用M200销轴式刚性吊杆,其余均采用锚拉板式PES7-187柔性吊杆。吊索标准间距为9 m,同一编号下吊索横向间距为14.2 m。

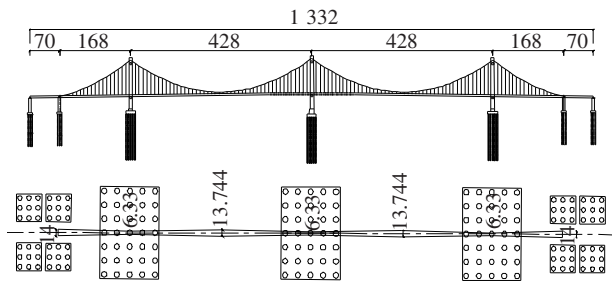


图1 总体布置图(单位:m)

1 工程概述

济南凤凰路黄河大桥为三塔钢箱梁空间缆自锚式

加劲梁全宽61.7 m,采用闭口式钢箱梁,外设人非挑臂,如图2所示。横隔板采用空腹桁架式横隔板,

设双向八车道,预留双线轨道交通实施空间。机动车道区域设12 cm厚混凝土桥面板。加劲梁采用南北两岸向中塔方向同步顶推施工方法,体系转换前需进行左右幅21 m、宽12 cm厚的桥面板现浇。

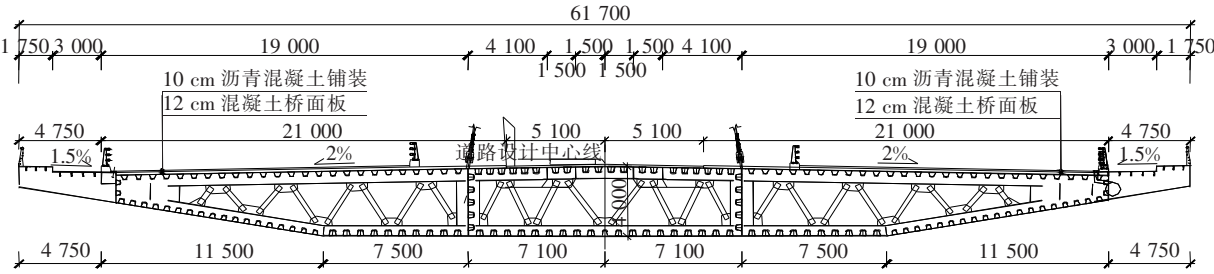


图2 加劲梁标准断面(单位:mm)

2 可行性吊索张拉方案探讨

对于传统的两塔自锚式悬索桥体系转换,其吊索张拉按边中跨有两类总体张拉思路:先边后中(先一次完成边跨吊索张拉锚固,再分批次张拉锚固中跨吊索)和边中共进(边中跨穿插进行吊索张拉锚固)两类。每类中跨吊索张拉均有从塔侧往中跨跨中或中跨跨中往塔侧两种;边跨吊索张拉均有从散索鞍(套)往塔侧、从塔侧往散索鞍(套)、从边跨跨中往散索鞍(套)与塔侧方向3种。由于从边跨跨中往散索鞍(套)与塔侧方向作为起始张拉位置,可能会存在吊索张拉力小但需要进行接长的问题,边跨起始张拉位置一般宜选择散索鞍或桥塔侧处,不论从散索鞍往桥塔侧或桥塔侧往散索鞍推进,其结构特点类似。

凤凰路黄河大桥空缆状态下边塔主索鞍向边跨预偏0.659 m,中塔主索鞍无预偏,中跨跨中点向边塔偏位0.430 m,同时跨中吊索长度为3.152 m(缆心到上销铰中心),将中跨跨中作为起始张拉位置,会出现较大的吊索纵向偏角,则吊索与钢导管会出现局部接触受力破损的情况。

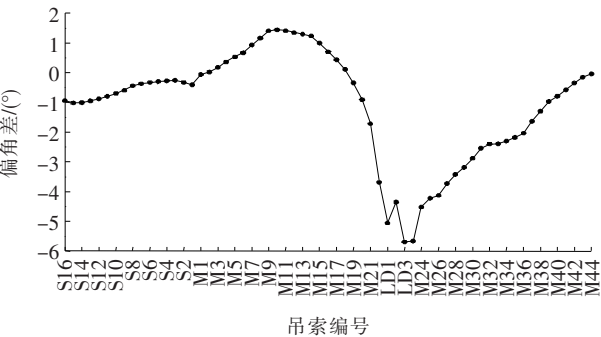


图3 中跨跨中为起始张拉位置时各吊索纵向偏角差

由图3可以看出:吊索M22~M29在安装过程中纵向偏角为 $-5.66^{\circ}\sim-3.19^{\circ}$,均难满足纵向设计控制偏角在 $\pm 3^{\circ}$ 以内的条件,因而对于三塔自锚式悬索桥,不宜采用从跨中往两塔方向进行张拉的方案,这一点有别于传统的两塔自锚式悬索桥(一般两塔悬索桥索鞍预偏量相等或偏差不大)。通过上述分析,可选择表1所示4种符合该桥的可行性吊索张拉方案,并可将方案1和3作为典型方案。

表1 4种符合该桥的可行性吊索张拉方案

方案编号	方案	边跨张拉	左(右)中跨张拉
1	边中	从边塔往散索鞍侧	从边(中)塔往
2	共进	从散索鞍往边塔侧	中跨跨中
3	先边	从边塔往散索鞍侧	从边(中)塔往
4	后中	从散索鞍往边塔侧	中跨跨中

3 张拉方式的探讨

在前期吊索张拉过程中,由于主缆张力提供的重力刚度小,容易出现吊索力小且变形大的情况;随着吊索不断张拉,主缆张力提供的重力刚度越来越大,张拉吊索时结构变形小,此时将吊索张拉到设计位置的拉力远比成桥索力大,需要同步张拉2对或3对相邻编号的吊索才能锚固(即多点同步张拉)或将一组吊索按一定顺序逐根张拉到一定索力,多次循环张拉后才能锚固(即单点循环张拉)。

该桥为三塔自锚式悬索桥,相比常规自锚式悬索桥,多出一个主跨,若采用多点同步对称张拉,则需要增加16套(4×2×2)千斤顶和连接杆,且多点张拉同步性较差。若采用单点循环对称张拉,则千斤顶数量

虽然减少,但张拉效率会有所降低。综合考虑设备数量和张拉效率,宜采用单点循环张拉方案并适当考虑备用千斤顶设备以节省倒顶时间。

4 体系转换所需考虑的控制参数

该项目体系转换方案需要遵循以下原则:① 目标状态原则:体系转换完成后各构件的受力和线形均满足设计规范要求;② 吊索对称同步张拉原则;③ 主体结构和临时构件受力安全原则:桥塔的拉应力、钢主梁以及现浇桥面板不超过规范允许的应力值;④ 几何相容原则:体系转换过程中吊索横向偏角与纵向倾角控制在 $\pm 3^\circ$;⑤ 经济性原则:在满足①~④原则的条件下,永久吊索或临时吊索张拉次数少、张拉千斤顶与配套的张拉设备数量少、吊索接长杆短且数量少。

5 空间缆吊索横向分析

将“边中共进”方案+横向顶撑与“先边后中”方案+跨中临时拉索的两个初步方案(由于篇幅有限,具体张拉工序未列出,可参考后文表格中所示工序,但略有不同)进行比选分析结果见图 4、5。

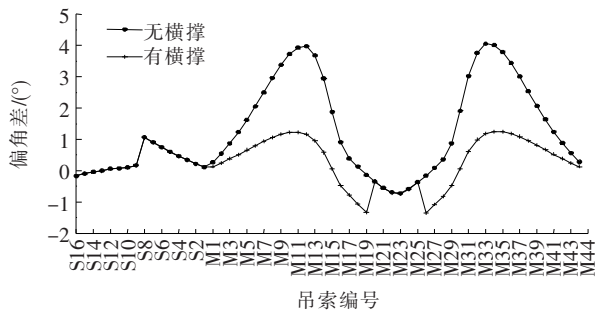


图 4 “边中共进”+横向顶撑时各吊索横向偏角差

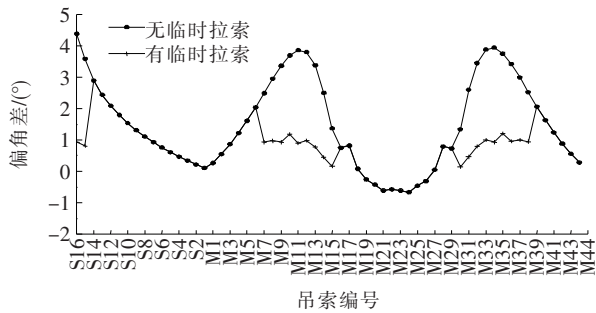


图 5 “先边后中”+临时拉索时各吊索横向偏角差

从图 4、5 可以看出:无论是横向顶撑还是临时拉

索,它们的作用均是改变主缆横向距离,很大程度上改善吊索横向偏角超限问题,便于吊索安装与张拉。两者不同之处在于临时拉索拉力对主缆既存在竖向拉力,还存在横向拉力。竖向拉力也会在吊索张拉过程中随着主缆线形的变化而变化,引起临时拉索内力变化,导致临时拉索需要进行多次索力调整;而跨中增设横向顶撑杆,不存在内力大幅度改变的问题,在吊索张拉过程中无需进行内力调整,一次到位。因而从张拉工效上,建议采用各中跨跨中增设一道横向顶撑的体系转换方案。

6 可行性方案及比选分析

根据上述吊索张拉方案、张拉方式、控制原则以及横向连接方式选择的探讨,经过大量的计算分析后确立了两种较优的体系转换方案。

表 2 为“边中共进”方案 1 具体实施时吊索张拉力和鞍座顶推量。从表 2 可知:该方案通过边中跨吊索穿插张拉来实现所有吊索张拉锚固。相比方案 3,方案 1 相对偏保守,边跨吊索张拉力相对较小;每个边跨需增加 3 套张拉设备,且连接杆长度较长,最大为 1.162 m,吊索张拉工序较多。

表 3 为“先边后中”方案 3 具体实施时吊索张拉力和鞍座顶推量。从表 3 可知:边跨吊索 S1~S14 均可在满足纵横向控制偏角差的条件下进行一次安装到位,S15~S16 需要通过中跨吊索张拉使其横向偏角满足要求后才能一次安装到位,无需多余的连接杆和千斤顶。但由于边跨吊索先张拉到位且张拉力小,而带来后期张拉中跨吊索时使得边跨吊索内力不断增大到成桥索力,这样方案 3 中所需的中跨吊索张拉力(最大 5 200 kN)稍大于方案 1(最大 4 600 kN),适当增加了现浇桥面板局部应力控制风险但总体可控。

表 4~6 分别为两种方案边跨部分吊索张拉锚固力与连接杆长度和张拉工序数量、鞍座顶推次数、最大张拉力、张拉设备等对比情况,两种方案总体均可行,但从经济性上,推荐采用“先边后中”方案 3。

由于篇幅有限,表中仅列出“边中共进”方案 1 部分结果和“先边后中”方案 3 的主要计算结果。方案 1 塔顶偏位和吊索安装时各索夹纵横向偏角差如图 6、7 所示。方案 3 各施工阶段吊索安装时塔顶偏位、横撑内力、各索夹纵横向偏角差、各吊索连接杆长度、各临时墩反力、钢梁上下缘应力包络图与桥面板应力包络图分别见图 8~15(由于对称性仅示一半)。

表2 “边中共进”方案1

工况	工况名称	张拉力/kN
1	空缆状态	
2	索夹安装	
3	安装顶撑杆(顶撑 7.2 m)	
4~11	依次安装 M44/S1/M1~M37/S8/M8	29.1~542.6
12~14	依次安装 M36/M9~M34/M11	169.7~1 008.8
15	第一次鞍座顶推	
16~18	依次安装 M33/M12~M31/M14	1 271.1~2 981.2
19	第二次鞍座顶推	
20~22	张拉 M16/M29 并张拉锚固 M15/M30	4 500(3 181.3)
23~24	第一次张拉 S9、M17/M28	3 000、4 600
25	第三次鞍座顶推	
26~35	张拉 S10 并张拉锚固 S9;循环张拉 M17/M28、M18/M27、M19/M26 并张拉锚固 M16/M29、拆除临时横撑	4 200(2 867.0)、4 600(4 131.1)
36~40	张拉 S11、S12 并张拉锚固 S10	4 200(3 497.9)
41~51	循环张拉 M18/M27、M19/M26、M20/M25 并张拉锚固 M17/M28	4 600(4 430.9)
52~61	循环张拉 M19/M26、M20/M25、M21/M24 并张拉锚固 M18/M27	4 600(4 570.7)
62~66	循环张拉 S12、S13 并张拉锚固 S11	4 200(4 322.3)
67~74	循环张拉 M20/M25、M21/M24、M22/M23 并张拉锚固 M19/M26	4 600(3 307.4)
75~78	循环张拉 M21/M24、M22/M23、LD1/LD3 并张拉锚固 M20/M25	4 500(3 457.1)
79~84	循环张拉 M22/M23、LD1/LD3 并张拉锚固 M21/M24、LD1/LD3、M22/M23、LD2	4 500(2 836.9、2 962.3、2 139.0、1 237.3)
85~87	循环张拉 S13、S14 并张拉锚固 S12	4 200(2 040.1)
88~90	循环张拉 S14、S15 并张拉锚固 S13	4 200(2 162.8)
91~94	张拉 S16 并依次张拉锚固 S15、S14、S16	(4 335.9、2 231.0、2 168.4)
95~97	第四次鞍座顶推、缠丝及拆除临时墩、桥面铺装	

表3 “先边后中”方案3

工况	工况名称	张拉力/kN
1	空缆状态	
2	索夹安装	
3	安装顶撑杆(顶撑 7.2 m)	
4~30	依次安装 S1~S14、M1/M44~M13/M32	18.3~215
31	第一次张拉 M14/M31	3 800
32~33	依次安装 S15~S16	(605、290)
34	第一次鞍座顶推 18 cm	
35~36	张拉 M15/M30 并张拉锚固 M14/M31	4 000(2 413)
37~41	张拉 M16/M29、M17/M28 并张拉锚固 M15/M30	4 500(4 339)
42	鞍座第二次顶推	
43~52	循环张拉 M17/M28、M18/M27、M19/M26 并张拉锚固 M16/M29	5 200(4 386)
53	第三次鞍座顶推	
54~64	循环张拉 M18/M27、M19/M26、M20/M25 并张拉锚固 M17/M28	5 200(3 730)
65~72	循环张拉 M19/M26、M20/M25、M21/M24 并张拉锚固 M18/M27	5 200(3 810)
73~76	循环张拉 M20/M25、M21/M24、M22/M23 并张拉锚固 M19/M26	5 200(3 783)
77	拆除临时横撑	
78~80	张拉 M21/M24、M22/M23 并张拉锚固 M20/M25	5 200(3 868)
81~83	张拉 LD1/LD3、M22/M23 并张拉锚固 M21/M24	5 200(3 202)
84	张拉锚固 LD1/LD3	3 187
85	张拉锚固 M22/M23	2 269
86	张拉锚固 LD2	1 239
87~89	第四次鞍座顶推、缠丝及拆除临时墩、桥面铺装	

表4 两种方案边跨部分吊索张拉锚固力与连接杆长度对比

吊索编号	锚固力/kN		连接杆长度/m	
	方案1	方案3	方案1	方案3
S8	122.2	18.3	0.042	0
S12	1449.0	46.9	1.162	0.028
S15	4335.9	604.7	0.656	0.178
S16	2168.4	290.2	0.384	0.073

注:括号内数值为吊索锚固时的张拉力,下同。

表 5 两种方案张拉工序、鞍座顶推次数、最大张拉力等对比

方案编号	张拉工序 数量/批	主鞍座顶推 次数/次	吊索最大 张拉力/kN
1	97	4	4 600
3	89	4	5 200

表 6 两种方案张拉设备数量对比

方案 编号	边跨最大连 接杆长度/m	中跨最大连 接杆长度/m	边跨千斤 顶/套	中跨千斤 顶/套
1	1.20	2.70	1×2×2	4×2×2
3	0.18	3.15	3×2×2	4×2×2

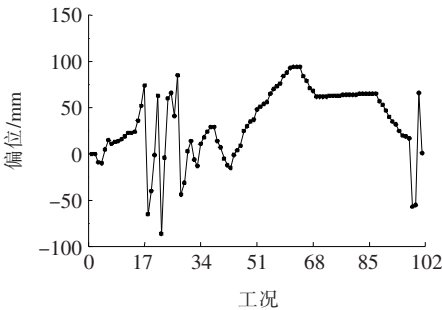


图 6 方案 1 各工况下边塔塔顶偏位

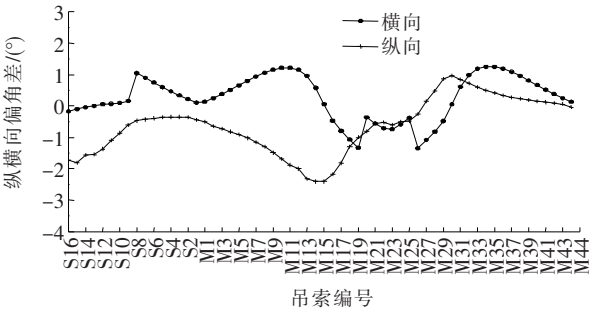


图 7 方案 1 吊索安装时各索夹纵横向偏角差

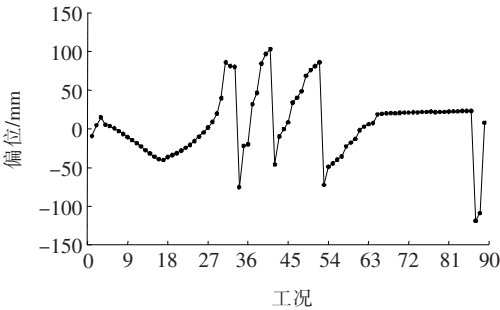


图 8 方案 3 各工况下边塔塔顶偏位

由图 6~15 可知:在各施工阶段下,桥塔偏位均处于-11~10 cm;跨中横撑内力随着吊索张拉逐渐减小至零;所需中跨连接杆最大长度为 3.15 m,所需边

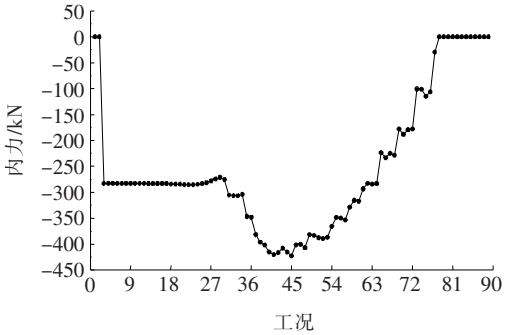


图 9 方案 3 各工况下跨中横撑内力

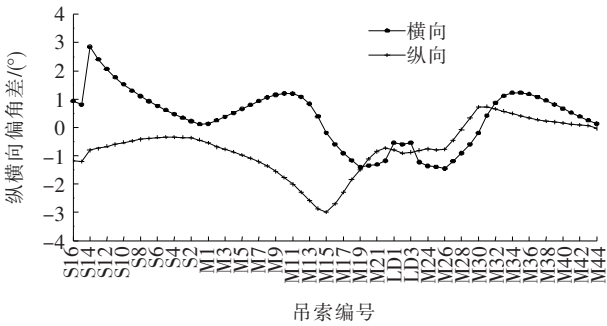


图 10 方案 3 吊索安装时各索夹纵横向偏角差

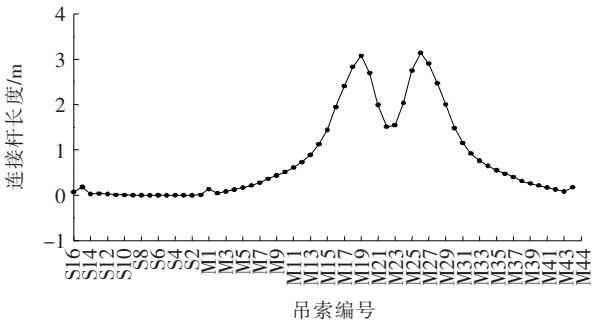


图 11 方案 3 各吊索连接杆长度

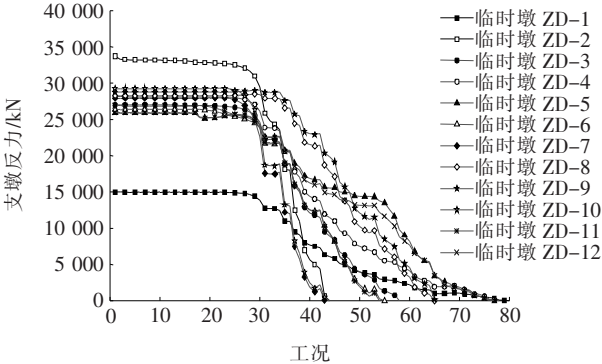


图 12 方案 3 各工况下临时墩反力

跨连接杆最大长度为 0.18 m;所有临时墩随着吊索不断张拉逐步脱空;钢梁上下缘与混凝土板未出现拉应力,结构均受力安全。

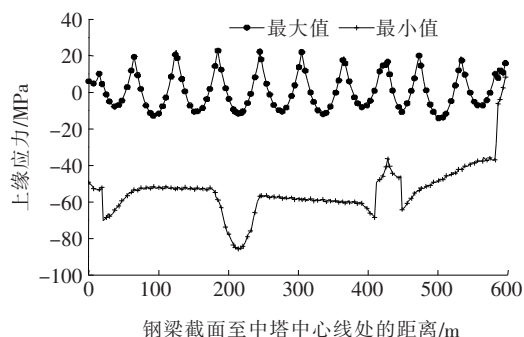


图13 方案3钢梁上缘应力包络图

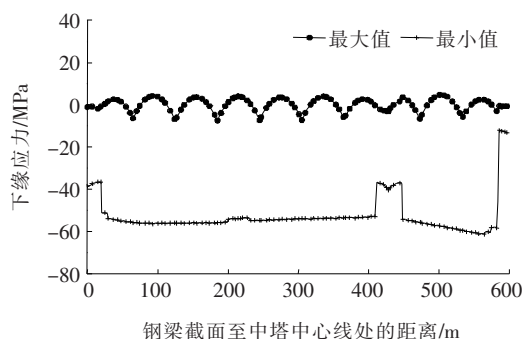


图14 方案3钢梁下缘应力包络图

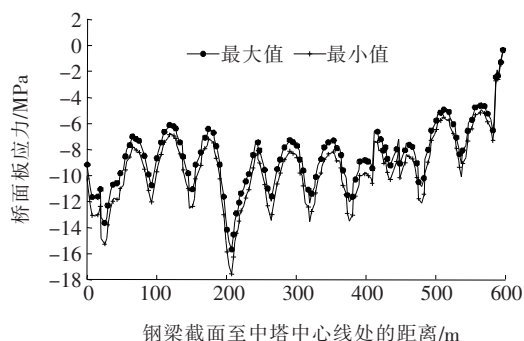


图15 方案3桥面板应力包络图

7 结论

(1) 从传统两塔平面缆自锚式悬索桥体系转换的特点进行分析,给出了两种吊索张拉方案(即“先边后中”和“边中共进”)、每种张拉方案3种不同起始张拉位置以及两类张拉方式(单点循环和多点同步)。结合三塔空间缆自锚式悬索桥特点,确定了各主跨对称张拉的总体方向和推荐的两种方案,均采用边塔侧吊索

张拉由边塔向锚跨侧推进,两中跨吊索均采用由两塔向中跨跨中推进的对称张拉方式,不宜从跨中往两塔方向推进。

(2) 通过体系转换过程吊索张拉方式的比选探讨,结合济南凤凰路黄河大桥结构特点、设备数量与张拉效率,确定了两种单点循环张拉的体系转换方案即“边中共进”方案1和“先边后中”方案3。

(3) 通过对典型方案在有无横向顶撑或临时拉索下进行结构受力分析探讨,在中跨跨中设置一道钢管横向顶撑或临时拉索均能解决吊索横向偏差的问题,若采用临时拉索则需要多次临时拉索索力调整,而采用钢管横向顶撑则无需进行其内力调整。建议采用各中跨跨中增设一道横向顶撑的方案。

(4) 给出了两种典型方案1和方案3的关键计算结果,表明了这两种方案的可行性和结构安全性。考虑两种方案的经济性和工效,确立“先边后中+单点循环张拉+跨中一道钢管横撑”的体系转换方案3为最优方案。

参考文献:

- [1] John Sun, Rafael Manzanarez, Marwan Nader. Suspension Cable Design of the New San Francisco—Oakland Bay Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(1).
- [2] 韩振勇,彭春阳,张日亮,等.天津富民桥可转动索夹的研发[J].桥梁建设,2008(5).
- [3] 张剑英,郝维索,戴建国,等.杭州钱塘江江东大桥总体设计[C].第十八届全国桥梁学术会议论文集,2008.
- [4] 马亮,郭坤,李小川.张家界大峡谷玻璃桥空间索面主缆线形调整施工技术[J].施工技术,2016(24).
- [5] 王成树,严伟飞,余茂峰.东苕溪大桥斜拉—悬索组合体系施工关键技术研究[J].公路交通技术,2011(5).
- [6] 程俭廷,张俊平,张力文.猎德大桥吊索张拉施工方案分析与优化[J].中外公路,2011(6).
- [7] Ho—Kyung Kim, Myeong—Jae Lee, Sung—Pil Chang. Determination of Hanger Installation Procedure for a Self—Anchored Suspension Bridge[J]. Engineering Structures, 2005, 28(7).
- [8] 孙全胜,高红帅.空间主缆自锚式悬索桥体系转换施工控制[J].中外公路,2013(2).