

# 单索面独斜塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究

佟志峰<sup>1</sup>, 熊雷<sup>2</sup>, 刘小奇<sup>1</sup>, 曹鸿猷<sup>2\*</sup>

(1. 中交第四公路工程局有限公司, 北京市 100022; 2. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 该文依托湖北宜昌兴山县峡口香溪河大桥工程, 采用 Midas/Civil 建立全桥空间有限元模型, 选取独塔斜塔斜拉桥桥塔施工过程中支撑主动顶推力大小和角度、主梁配重及拉索张拉力作为结构参数, 对桥塔、支撑受力性能进行研究, 结果表明: 随着顶推力增加, 桥塔和支撑施工阶段最大应力逐渐增加; 随着顶推力角度增加, 桥塔和支撑施工阶段最大应力逐渐减小, 尤其是当顶推力角度为  $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$  时, 支撑应力随角度变化较为明显; 主梁配重对支撑轴力有较大影响, 随着主跨侧主梁配重位置逐渐远离桥塔, 支撑施工阶段最大轴力呈先增加后减小趋势; 拉索张拉力对支撑轴力影响最为显著, 敏感性最高, 减小边跨侧拉索张拉力可明显减小支撑轴力。

**关键词:** 独斜塔斜拉桥; 参数分析; 支撑主动顶推力; 主梁配重; 拉索张拉力

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

相较于普通斜拉桥, 独斜塔斜拉桥不仅具有结构轻盈、线形流畅的特点, 而且倾斜的桥塔更给人们带来不对称的美感和强大的视觉冲击力<sup>[1]</sup>。

然而, 相较于直塔斜拉桥, 斜塔由于塔身的倾斜, 自重作用会对桥塔的根部产生较大的弯矩, 从而对施工过程中临时支撑的设计提出了更高技术要求<sup>[2-3]</sup>。目前已建成的多座斜塔斜拉桥, 如中山市板芙二桥<sup>[4]</sup>采用支架和悬臂浇筑施工技术; 哈尔滨太阳桥<sup>[5]</sup>采用斜塔吊装技术; 合肥市铜陵路斜拉桥<sup>[6]</sup>采用悬臂内拉法, 其优点是能在满足施工安全前提下降低施工成本; 沈阳市富民桥<sup>[7]</sup>采用体内劲性支架施工法, 其特点是主梁与斜塔采取同步悬臂施工; 南京市世纪塔<sup>[8]</sup>采用自平衡施工技术; 新密市溱水路大桥<sup>[9]</sup>斜塔采用满堂支架及预埋钢板斜拉带法施工。

斜拉桥为多次超静定结构, 其施工工期长, 主梁及桥塔受力复杂, 影响参数众多<sup>[10]</sup>。其施工方法和安装过程与成桥后结构内力有密切关系, 多种因素和结构参数均可能对桥塔及主梁施工控制结果产生重要影响<sup>[11]</sup>。黄灿<sup>[12]</sup>对苏通长江大桥进行了材料弹性模量、重量、塔高及温度等参数影响分析, 认为塔高和温度是最为敏感的因素; 刘旭政等<sup>[13]</sup>对独塔斜拉桥多种结构参数进行分析, 认为主梁重度值、主梁超方量及拉索索力值对结构内力影响较大。目前独斜塔斜拉桥施

工研究及参数影响分析已取得丰硕的成果, 然而对软弱地基条件下采用背撑支撑施工的独斜塔斜拉桥的研究较少。鉴于此, 该文以香溪河大桥为工程背景, 分析支撑主动顶推力大小和背撑顶三角撑角度、主梁配重及拉索张拉力等设计参数对桥塔及支撑的影响, 识别出影响空间异形独斜塔斜拉桥的施工关键设计参数, 为以后类似工程的施工设计提供参考。

## 1 工程概况及有限元模型

### 1.1 工程概况

兴山县峡口香溪河大桥为独斜塔单索面混合梁斜拉桥, 其跨径布置为  $(90+238)$  m, 如图 1 所示。该桥为塔梁固结体系, 其边跨和主跨分别采用混凝土主梁和钢箱主梁, 钢-混结合段设在主跨侧距桥塔中心线 11 m 处。边跨主梁采用单箱双室预应力混凝土箱梁, 标准梁段高 2.98 m, 宽 22.5 m, 主跨主梁为整体钢箱梁, 梁高 3 m。桥塔采用“琵琶”形斜向桥塔, 塔身顺桥向偏离铅垂面  $10^{\circ}$ , 倾向边跨侧。主塔总高度竖向为 126 m, 塔身采用箱形截面, 全桥共 68 根斜拉索。

桥塔采用液压爬模系统逐段现浇施工, 无索区段主塔施工过程中, 由于斜塔身自重影响将在塔底产生倾覆力矩和较大的拉应力, 并随着塔身的升高, 塔柱顺

收稿日期: 2022-06-16(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51708436, 51908437)

作者简介: 佟志峰, 男, 大学本科, 高级工程师。E-mail: 10730814@qq.com

\* 通信作者: 曹鸿猷, 男, 博士, 教授。E-mail: caohongyou0625@163.com

桥向的倾覆力矩将进一步增加,同时在斜拉索挂索过程中,水平分力的不对称性,加剧了倾覆力矩和拉应力的发展,为避免出现裂缝,无索区段塔柱施工过程中分段设置背向斜撑,采用千斤顶施加主动顶推力平衡倾覆力矩。

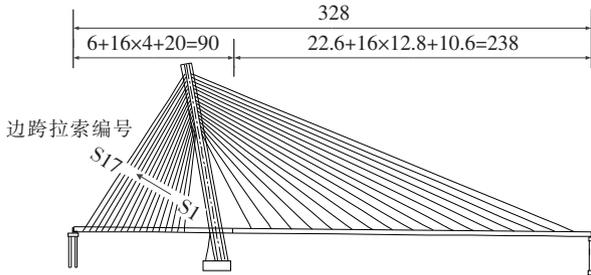


图 1 香溪河大桥桥型布置图(单位:m)

当塔柱施工高度至 46、57 和 77 m 时,施工相应高度的桥塔背向支撑并施加顶推力,当塔柱施工高度至 81 m 时开始主梁悬臂吊装施工及张拉斜拉索。3 道背向支撑与桥塔间通过三角架传力。每道支撑在横桥向分左右两部分对称布置,材料均采用 Q345 钢材,支撑高度由低至高定义为支撑 1、支撑 2 和支撑 3。墩台采用端承桩基础,根据勘察资料及岩、土室内试验结果,该桥址表层为软弱地基土,承载能力较低,因此在桥塔施工过程中背撑所能承受的荷载有限。

该桥为塔梁固结体系,考虑桥塔根部受力较为复杂和施工的安全性,在施工过程中桥塔的最大拉应力不得超过 1.5 MPa,支撑钢结构的应力不超过 250 MPa,支撑的地基承载力按 340 kPa 计算,钢主梁应力不超过规范规定的容许应力值。

## 1.2 有限元模型

采用 Midas/Civil 建立香溪河大桥有限元模型,主梁建模方式采用鱼骨梁,主梁、主墩及桥塔采用空间梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟,桥塔处主梁通过刚性连接固结于塔墩上,混凝土主梁的浇筑支架按仅受压节点弹性支撑模拟,桩基采用土弹簧模拟桩土间相互作用,桩基上端点与桥塔间通过钢臂(弹性连接)连接,下端点与地面固结来模拟端承桩。全桥模型共有 4 459 个节点、4 909 个梁单元和 70 个桁架单元,施工阶段按实际施工过程模拟,模型中满堂支架采用只受压弹簧模拟。

图 2 为 3 道背撑的细部构造及设计参数,每个斜撑由 6 根  $\phi 800$  壁厚为 10 mm 的主管组成,采用  $\phi 270$  壁厚为 6.5 mm 的小钢管通过焊接将 6 根主管联结形成主体。支撑顶部的三角架由双拼 45a 的工字钢焊接

而成。

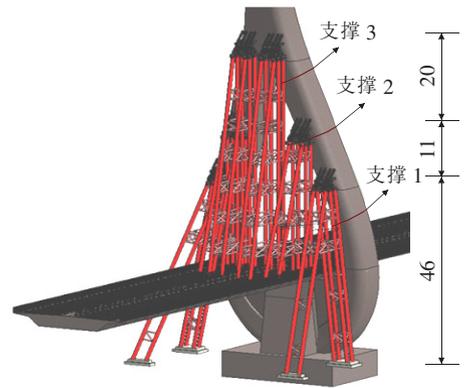


图 2 3 道支撑的设计参数(单位:m)

## 2 结构参数分析

由于该桥倾斜的桥塔在施工过程中不仅受自重的影响较大,而且同时受 3 道背撑和分批张拉的斜拉索的共同作用,因此桥塔受力较为复杂。为确保桥塔施工全过程拉、压应力在规范允许的限值范围内,需对桥塔施工全过程应力进行控制。此外,背撑自身的安全性也直接关系整个桥塔的施工安全,所以还需控制背撑应力在钢管材料允许范围内。除此之外,基于该桥地质条件为软弱地基土,承载能力较低,为避免由于桥塔背撑作用过大而导致基础承载能力不足,桥塔背撑最大竖向力也是该桥塔施工的关键控制参数。

根据香溪河大桥结构特点及施工方式,该文选取对桥塔应力和支撑应力及轴力影响较大的支撑主动顶推力大小和角度、主梁配重、拉索张拉力为研究参数。

### 2.1 顶推力大小对桥塔应力的影响

香溪河大桥桥塔背向支撑通过千斤顶施加主动顶推力,主动顶推力过大会导致桥塔边跨侧拉应力较大,对桥塔产生不利影响;主动顶推力过小会导致其竖向分力很小,不能发挥支撑对桥塔的约束作用。

根据香溪河大桥的结构参数,结合支撑特点,原设计中 3 道支撑每侧顶推力分别为 4 000、4 800 和 5 500 kN。分别改变 3 道支撑主动顶推力大小研究其对桥塔受力的影响,分析结果如表 1 所示。

由表 1 可知:随着支撑 1、2、3 主动顶推力增加,桥塔施工阶段最大拉应力均逐渐增加,最大压应力均逐渐减小,且变化规律呈线性变化。

### 2.2 顶推力大小对支撑应力的影响

表 2 为不同主动顶推力作用下,施工过程中各背撑的最大应力值。

表1 改变各道支撑顶推力时桥塔施工过程中最大应力

支撑1 顶推力/ kN	桥塔施工阶段 最大应力/MPa		支撑2 顶推力/ kN	桥塔施工阶段 最大应力/MPa		支撑3 顶推力/ kN	桥塔施工阶段 最大应力/MPa	
	拉应力	压应力		拉应力	压应力		拉应力	压应力
4 000	1.66	-9.85	4 800	1.61	-9.88	5 500	1.66	-9.85
4 200	1.71	-9.82	5 000	1.66	-9.85	5 700	1.71	-9.82
4 400	1.75	-9.80	5 200	1.71	-9.82	5 900	1.76	-9.79
4 600	1.79	-9.77	5 400	1.76	-9.79	6 100	1.81	-9.76
4 800	1.83	-9.75	5 600	1.81	-9.76	6 300	1.86	-9.73
5 000	1.88	-9.73	5 800	1.87	-9.73	6 500	1.91	-9.70
5 200	1.92	-9.70	6 000	1.93	-9.70	6 700	1.95	-9.67

表2 改变各道支撑顶推力时支撑施工过程中最大应力

支撑1 顶推力/ kN	支撑1施工阶段 最大应力/MPa		支撑2 顶推力/ kN	支撑2施工阶段 最大应力/MPa		支撑3 顶推力/ kN	支撑3施工阶段 最大应力/MPa	
	拉应力	压应力		拉应力	压应力		拉应力	压应力
4 000	154.0	-183.8	4 800	181.4	-197.0	5 500	131.2	-233.4
4 200	158.6	-187.3	5 000	184.2	-200.1	5 700	134.6	-236.1
4 400	163.1	-191.1	5 200	187.1	-203.3	5 900	137.4	-240.2
4 600	167.3	-194.2	5 400	190.0	-206.4	6 100	140.4	-243.8
4 800	171.8	-197.7	5 600	192.9	-209.5	6 300	143.8	-247.0
5 000	176.2	-201.4	5 800	195.8	-212.7	6 500	147.5	-250.4
5 200	180.5	-204.7	6 000	198.7	-215.8	6 700	150.3	-253.7

由表2可知:随着支撑1、2、3主动顶推力增加,支撑1、2、3施工阶段最大拉应力均逐渐增加,最大压应力均逐渐增加。

总体而言,桥塔背向支撑施工过程中最大拉、压应力均随着支撑主动顶推力增加而增大,变化规律基本

呈线性变化。

香溪河大桥背撑采用Q345钢,根据上述参数分析结果,最终3道支撑主动顶推力分别确定为4 000、5 000、5 500 kN时,所有支撑在施工阶段应力包络结果如图3所示。

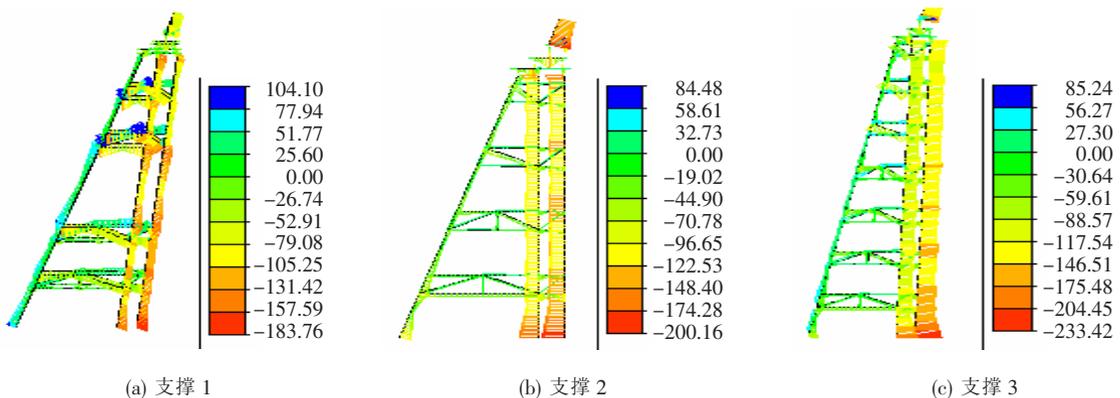


图3 支撑施工阶段最大压应力包络结果(单位:MPa)

由图3可知:3道支撑的最大压应力分别为183.76、200.16和233.42 MPa,均小于Q345钢的容许应力值,满足规范要求。

### 2.3 顶推力大小对支撑轴力的影响

3道支撑下支点与基础固结,支撑轴力过大会导致基础承受较大荷载。为了研究顶推力大小对支撑内

力的影响,采用两种不同的主动顶推力方案进行对比,具体支撑主动顶推力大小见表3。分别得到两种顶推力方案中3道支撑各个施工阶段轴力大小,由于支撑在主梁横断面方向对称布置,故只给出单边支撑轴力如图4、5所示。图中纵坐标表示单边支撑轴力,横坐标表示桥梁施工阶段(共83个施工阶段),下同。

表 3 两种顶推力方案

顶推方案	支撑主动顶推力/kN			支撑施工阶段最大轴力/kN		
	支撑1	支撑2	支撑3	支撑1	支撑2	支撑3
1	4 000	5 000	5 500	8 635	10 998	11 605
2	4 000	2 500	2 750	9 975	10 405	8 951

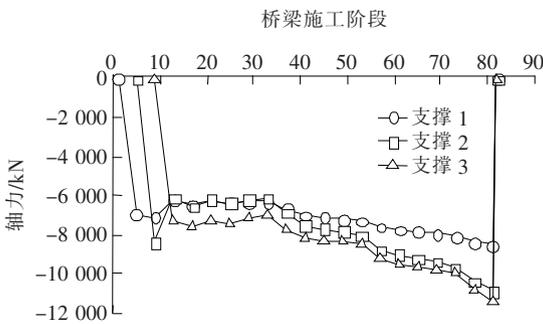


图 4 顶推方案 1 各支撑轴力

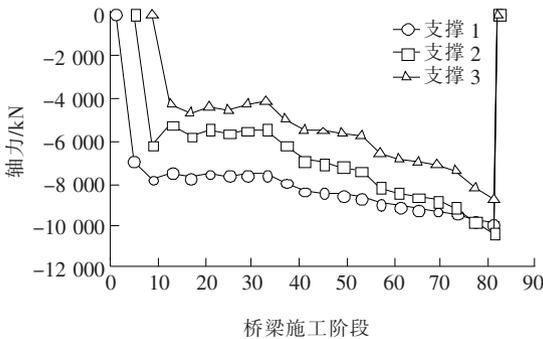


图 5 顶推方案 2 各支撑轴力

从图4、5可以看出:在两种顶推力方案中,3道支撑轴力大小不同,但其随施工阶段变化趋势相同。根据顶推力方案结果对比可知:保持支撑1顶推力不变,在支撑2和支撑3主动顶推力分别减小2 500 kN和2 750 kN的情况下,支撑1施工阶段最大轴力增加1 340 kN,支撑2和支撑3施工阶段最大轴力分别减小593 kN和2 654 kN。

#### 2.4 三角架角度对桥塔及自身应力的影响

图6为支撑顶部三角架的局部构造,在顶升过程中,三角架的角度 $\alpha$ 决定了支撑对桥塔作用力的竖向分力及水平分力,该节讨论 $\alpha$ 对桥塔及三角架应力的

影响。保持三角架下面的水平杆不变,通过调整斜杆上锚点的位置来改变三角架的角度。由于桥塔轴线变化不大,所以3道支撑顶推力角度对桥塔及三角架应力的影响是相同的,取支撑1计算结果为例。结合工程特点,设置三角架角度 $\alpha$ 由 $42.9^\circ$ 增加至 $72.9^\circ$ ,研究支撑主动顶推力角度对桥塔应力及支撑1应力的影响,计算结果如表4所示。

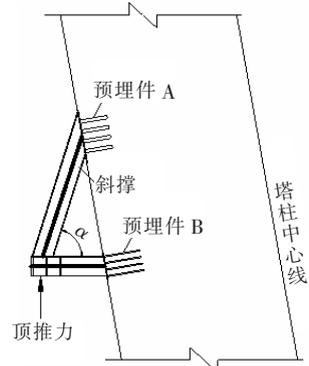


图 6 三角架的局部构造

表 4 不同三角架角度下桥塔应力及支撑1应力

支撑1三角架角度/ $^\circ$	桥塔施工阶段最大应力/MPa		支撑1施工阶段最大应力/MPa	
	拉应力	压应力	拉应力	压应力
42.9	1.91	-10.12	116.00	-122.70
45.9	1.88	-10.08	110.00	-115.40
49.4	1.84	-10.04	105.40	-108.10
53.2	1.81	-10.00	101.70	-104.50
57.5	1.77	-9.96	98.70	-102.70
62.2	1.73	-9.93	96.50	-101.90
67.3	1.70	-9.89	95.30	-101.10
72.9	1.66	-9.85	95.20	-99.80

从表4可知:

(1) 随着三角架角度的增加,桥塔施工阶段最大拉应力由1.91 MPa逐渐减小到1.66 MPa,最大压应力由10.12 MPa逐渐减小到9.85 MPa,变化规律基本呈线性变化。

(2) 支撑1施工阶段最大拉应力由116 MPa减小到95.2 MPa,最大压应力由122.7 MPa减小到99.8 MPa。并且当顶推力角度为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 时,支撑1应力减小幅度较明显,最大拉应力减小了17.3 MPa,最大压应力减小了20.0 MPa;当顶推力角度为 $60^\circ \sim 75^\circ$ 时,角度变化对支撑1应力影响较小,最大拉应力减小了3.5 MPa,最大压应力减小了2.9 MPa。

### 2.5 主梁配重对支撑轴力的影响

为研究主梁配重对桥塔背向支撑施工阶段轴力的影响,设置无配重以及配重分别设置在主跨侧 1<sup>#</sup> ~ 11<sup>#</sup> 钢箱梁段上的 12 种配重方案,每个配重方案对应的加载位置如图 7 所示。模型中主梁配重通过均布荷载施加,荷载大小设置为 100 kN/m。在不同配重方案下,读取施工阶段支撑 2 和支撑 3 最大轴力。由于支撑在主梁横断面方向对称布置,故只读取单边支撑施工阶段最大轴力如表 5 所示。

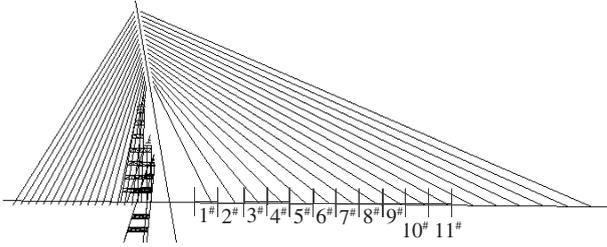


图 7 主梁配重位置示意图

表 5 不同配重位置下支撑施工阶段最大轴力

钢梁段配重位置	支撑 2 单边轴力/kN	支撑 3 单边轴力/kN
0(无配重)	11 013.9	11 609.5
1 <sup>#</sup>	10 941.5	11 534.2
2 <sup>#</sup>	10 843.0	11 434.0
3 <sup>#</sup>	10 691.2	11 257.9
4 <sup>#</sup>	10 494.5	11 019.2
5 <sup>#</sup>	10 319.6	10 795.7
6 <sup>#</sup>	10 182.5	10 610.4
7 <sup>#</sup>	10 086.7	10 471.9
8 <sup>#</sup>	10 036.8	10 394.0
9 <sup>#</sup>	10 008.1	10 335.8
10 <sup>#</sup>	10 026.6	10 329.3
11 <sup>#</sup>	10 054.9	10 403.8

由表 5 可知:支撑 2 施工阶段最大轴力随着梁段配重位置从 1<sup>#</sup> 到 11<sup>#</sup>,由 11 013.9 kN 逐渐减小至 10 008.1 kN,当配重位置在梁段 9<sup>#</sup> 时,支撑轴力最小,此时相较于无配重支撑轴力减小了 1 005.8 kN;当配重位置在梁段 10<sup>#</sup> 和 11<sup>#</sup> 时,支撑轴力又逐渐增加至 10 054.9 kN;支撑 3 施工阶段最大轴力随着梁段配重位置从 1<sup>#</sup> 到 11<sup>#</sup>,由 11 609.5 kN 逐渐减小至 10 329.3 kN,当配重位置在梁段 10<sup>#</sup> 时,支撑轴力最小,此时相较于无配重支撑轴力减小了 1 280.2 kN;当配重位置在梁段 11<sup>#</sup> 时,支撑轴力增加至 10 403.8 kN。

### 2.6 拉索张力对支撑内力的影响

由于香溪河大桥为不对称跨斜塔斜拉桥,支撑内力对施工过程中斜拉索的张力极为敏感,因此该节讨论两种斜拉索施工索力张拉方案对支撑内力的影响。两种拉索张拉方案中主跨侧拉索拉力保持相同,边跨侧拉索张力不同。建立两种拉索张拉方案模型,每个索力张拉方案的索力值如表 6 所示,其中索力张拉方案 2 的索力值为方案 1 的 0.8 倍。得到 3 道支撑每个施工阶段最大轴力如图 8、9 所示。

表 6 两种拉索张拉方案索力值

边跨侧拉索号	方案 1		方案 2	
	初拉力	二次张拉	初拉力	二次张拉
S1	1 133	1 619	906.4	1 295.2
S2	1 147	1 639	917.6	1 311.2
S3	1 271	1 817	1 016.8	1 453.6
S4	1 540	2 000	1 232.0	1 600.0
S5	1 528	2 083	1 222.4	1 666.4
S6	1 516	2 116	1 212.8	1 692.8
S7	1 593	2 207	1 274.4	1 765.6
S8	1 694	2 320	1 355.2	1 856.0
S9	1 683	2 405	1 346.4	1 924.0
S10	1 673	2 490	1 338.4	1 992.0
S11	1 830	2 557	1 464.0	2 045.6
S12	1 944	2 578	1 555.2	2 062.4
S13	2 120	2 629	1 696.0	2 103.2
S14	2 280	2 757	1 824.0	2 205.6
S15	2 390	2 814	1 912.0	2 251.2
S16	2 430	2 879	1 944.0	2 303.2
S17	2 243	2 905	1 794.4	2 324.0

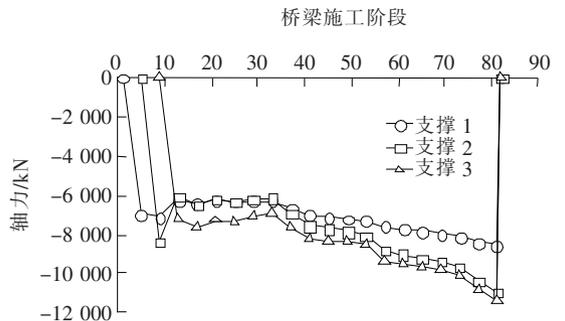


图 8 拉索张拉方案 1 支撑施工阶段轴力

从图 8、9 可以看出:两种拉索张拉方案中 3 道支撑轴力随施工阶段变化趋势相同,支撑轴力大小不同。在拉索张拉方案 1 中,支撑 1、2、3 施工阶段轴力

最大值分别为 8 635、10 998 及 11 605 kN；在拉索张拉方案 2 中，支撑 1、2、3 施工阶段轴力最大值分别为 7 596、8 312 及 8 530 kN。方案 2 中 3 道支撑施工阶段最大轴力比方案 1 中分别减小了 1 039、2 686 和 3 075 kN，根据两种拉索张拉力方案及结果对比可知，减小边跨侧拉索张拉力可有效减小支撑施工阶段轴力。

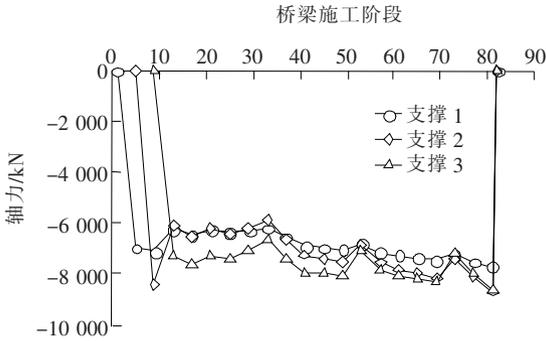


图 9 拉索张拉方案 2 支撑施工阶段轴力

### 3 结论

该文结合兴山县峡口香溪河大桥工程，选取独斜塔斜拉桥桥塔施工过程中支撑主动顶推力大小和角度、主梁配重及拉索张拉力为结构参数，对施工中桥塔及支撑受力性能进行研究，得到以下结论：

(1) 随着背向支撑顶推力增大，桥塔施工阶段最大拉、压应力均呈线性增加趋势。支撑顶推力大小对支撑应力有较大影响，随着顶推力增大，支撑施工阶段最大拉应力和最大压应力逐渐增大，当支撑顶推力变化幅度达 600 kN 时，3 道支撑最大应力增量分别为 26.5、18.8 和 20.3 MPa。支撑主动顶推力大小对支撑轴力有较大影响，在第 2 道和第 3 道支撑顶推力减小一半的情况下，支撑施工阶段最大轴力分别减小 593 和 2 654 kN。

(2) 随着支撑主动顶推力角度增加，桥塔施工阶段最大拉、压应力均呈线性减小趋势。支撑主动顶推力角度对支撑应力有较大影响，随着顶推力角度及三角架角度增加，支撑施工阶段最大拉应力及最大压应力逐渐减小，且当顶推力角度为  $40^\circ \sim 60^\circ$  时，支撑应力变化明显，最大应力变幅达 20 MPa；当顶推力角度为  $60^\circ \sim 75^\circ$  时，角度变化对支撑应力影响较小，最大应力

变幅仅 3.5 MPa。

(3) 主梁配重对桥塔背向支撑轴力有较大影响，随着主跨侧主梁配重位置逐渐远离桥塔，支撑施工阶段最大轴力先增加后减小。当主梁配重设置在钢梁段 9<sup>#</sup> 时，支撑 2 轴力达到最小为 10 008.1 kN，相比无配重方案轴力减小了 1 005.8 kN；当主梁配重设置在钢梁段 10<sup>#</sup> 时，支撑 3 轴力达到最小为 10 329.3 kN，相比无配重方案轴力减小了 1 280.2 kN。

(4) 拉索张拉力对桥塔背向支撑轴力影响最为显著，保持主跨侧拉索张拉力不变，减小边跨侧拉索张拉力可有效减小 3 道支撑施工阶段最大轴力，支撑 3 轴力减小幅度最为明显。但在设计过程中有必要仔细比选拉索张拉力，拉力过小会影响桥塔及主梁线形以及最终成桥状态。

### 参考文献：

- [1] 陈明宪. 斜拉桥的发展与展望[J]. 中外公路, 2006, 36(4): 76-86.
- [2] 张博. 地锚式单跨独斜塔斜拉桥研究——部分 2: 参数分析[J]. 中外公路, 2016, 36(6): 163-167.
- [3] 张博. 地锚式单跨独斜塔斜拉桥研究——部分 1: 力学建模[J]. 中外公路, 2016, 36(5): 147-151.
- [4] 江德增, 王荣辉, 马牛静. 混凝土斜塔斜拉桥的结构设计与施工特点[J]. 铁道建筑, 2009, 49(11): 8-10.
- [5] 朱骏, 王健康, 朱伟新, 等. 哈尔滨太阳桥钢结构主塔吊装施工技术[J]. 建筑技术, 2003, 34(5): 357-359.
- [6] 程红松. 无背索斜拉桥斜塔施工技术探讨[J]. 铁道建筑, 2007, 47(1): 23-25.
- [7] 王建华, 许佳平, 陈卫成. 沈阳市富民桥斜塔施工新技术[J]. 桥梁建设, 2004, 34(S1): 47-49.
- [8] 邹焕华, 周祖干. 南京市世纪塔工程砼斜塔自平衡法施工技术[J]. 交通科技, 2003(1): 17-19.
- [9] 贾贯乾. 波形钢腹板箱梁无背索斜拉桥斜塔施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2015(2): 18-20, 61.
- [10] 江晓鸣. 独塔单索面混合梁斜拉桥荷载试验研究[J]. 福建建设科技, 2019(5): 67-69.
- [11] 胡建华, 廖建宏. 多塔斜拉桥关键技术研究[J]. 中外公路, 2002, 22(3): 32-36.
- [12] 黄灿. 基于几何控制法的大跨度斜拉桥自适应施工控制体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [13] 刘旭政, 黄平明, 许汉铮. 独塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(6): 63-66.