

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.011

复杂异型小曲线独斜塔环梁人行斜拉桥 受力性能分析与施工监测

叶昱

(泉州市交通运输综合执法支队,福建泉州 362000)

摘要: 复杂异型小曲线独斜塔环梁人行斜拉桥作为一种特殊结构形式的桥梁,为了分析其受力性能,以某实际工程为背景,通过建立成桥有限元模型,并采用两种软件进行对比验证,系统分析该桥在恒载与活载作用下的整体与关键部位受力性能,并进行施工监测。结果表明:复杂异型小曲线独斜塔环梁人行斜拉桥在恒载与活载作用下主梁受力趋势相同且具有很强的空间性;箱形主梁受对称分布的压应力,中环梁和边环梁均受拉应力,均在塔梁连接处达到应力最大值;主塔整体受压,应力自塔顶至塔底呈现先增大后减小再增大趋势;恒载和人群荷载作用下,在 $\alpha = 120^\circ$ 和 240° 处,即悬挂索与缆风索共同锚固于箱梁处,两根悬挂索应力出现最大值为108.5 MPa;主梁位移呈现对称分布,最大位移发生在边环梁上夹角 $\alpha = 180^\circ$ 处,为-29.62 mm。通过现场监测得出,主梁各实测高程与理论高程的偏差均在14 mm以内;主塔根部截面和斜柱根部截面受压且应力变化趋势与理论计算值基本吻合;悬挂索与背索的拉力实测值与理论值偏差均在 $\pm 10\%$ 以内,在最终成桥索力差距在 $\pm 5\%$ 以内,满足精度要求。

关键词: 人行斜拉桥;复杂异型小曲线独斜塔环梁;受力分析;施工监测

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0076-07

Mechanical Performance Analysis and Construction Monitoring of Pedestrian Cable-stayed Bridge with Complex Special-shaped Small Curve Single Inclined Tower Ring Beam

YE Yu

(Quanzhou Transportation Comprehensive Law Enforcement Detachment, Quanzhou, Fujian 362000, China)

Abstract: As a bridge with a structurally unique form, the complex irregular small-curve single-pylon cable-stayed footbridge with ring beams holds significant research importance regarding its mechanical performance and construction control. Based on an actual project, a finite element model of the completed bridge was established and verified using two different software packages. A systematic analysis was conducted on the mechanical performance of the entire bridge and its key components under dead and live loads, and construction monitoring was carried out accordingly. The results indicate that the main girder exhibits consistent stress trends under both dead and live loads, demonstrating strong spatial mechanical behavior. The box main girder is subjected to symmetrically distributed compressive stress, while both the middle and side ring beams experience tensile stress, with the peak stresses occurring at the pylon-girder connection. The pylon is primarily in compression overall, and its stress along the height shows a trend of first increasing, then decreasing, and finally increasing again. Under the combined effects of dead load and crowd load, when $\alpha = 120^\circ$ and 240° —that is, when the suspension cable and the wind cable are jointly anchored to the box girder—the maximum stress in the two suspension cables reaches 108.5 MPa. The displacement of the main girder shows a symmetrical distribution, with the maximum displacement of -29.62 mm occurring at the $\alpha = 180^\circ$ position on the side

收稿日期:2025-10-03

修稿日期:2025-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52578183)

作者简介:叶昱(1981—),男,高级工程师,主要从事桥梁与隧道工程建设与质量管理工作。E-mail:154197336@qq.com

ring beam. Field monitoring data shows that the deviation between the measured elevation and the theoretical elevation of the main girder is within 14 mm. The stress variation trends in the pylon root section and the inclined column root section are basically consistent with the theoretical calculations, and both sections are under compression. The deviation between the measured and theoretical tensions of the stay cables and backstay cables is within $\pm 10\%$, and the difference in cable forces at the final completed bridge state is within $\pm 5\%$, meeting the required accuracy standards.

Keywords: pedestrian cable-stayed bridge; complex special-shaped small curve single inclined tower ring beam; force analysis; construction monitoring

由于人们对桥梁美观性及其与环境相融合要求、地质结构限制等综合因素影响,斜拉桥在拉索外形、拉索布置以及桥塔形式上出现了各种变化^[1]。独斜塔曲线斜拉桥既具有独斜塔斜拉桥的受力特点,也具有曲线斜拉桥“弯扭耦合”的效应,与常规斜拉桥相比,受力状况更为复杂,有着很强的空间性^[2]。

已有许多学者对斜塔斜拉桥与曲线斜拉桥进行了复杂桥梁在荷载作用下的受力性能研究,并且成功用于施工监测指导,确保施工安全。在斜塔斜拉桥方面,贾伟红等^[3]采用有限元对某拟建双塔单索面钢结构人行斜拉桥进行受力性能分析,结果表明,在静荷载作用下,其主梁和主塔的应力、稳定性以及斜拉索的安全系数均满足规范要求。刘世明等^[4]采用有限元软件对大跨人行异型斜拉桥,结合桥梁施工方法对结构进行了静力特性分析,结果表明,塔梁各截面承载力满足要求。林杰等^[5-6]以某独斜塔斜拉桥的设计及施工为工程背景,通过有限元软件对其恒载和活载作用下的主梁及桥塔受力进行分析,并采用 ANSYS 对其进行局部计算,验证了设计方案的可行性和安全性。佟志峰等^[7]通过空间有限元模型对某独斜塔斜拉桥施工过程中的关键设计参数进行研究,结果表明,拉索张力对支撑轴力影响最为显著。罗雷等^[8]通过对斜拉桥的施工过程进行仿真分析,以及全过程施工监控,证明了斜拉桥建成后的受力满足要求。汪高斯^[9]通过有限元对五种不同关键参数对地锚式单跨独斜塔斜拉桥恒载作用下的受力进行分析,得到了全桥受力较为合理的参数取值。祝嘉翀等^[10]对不同力学参数对独塔斜拉桥成桥状态下的力学性能的影响规律进行研究,结果表明,主梁容重和拉索初张力对主梁的线型、应力和成桥索力影响较大。在曲线斜拉桥方面,刘本永^[11]以某独塔混合式结合梁斜拉桥为工程背景,对主桥在静、活载及温度荷载作用下的变形及刚度进行研究,结果表明,该设计方案的各项指标满足设计要求。陈锋等^[12]采用有限元模型,对某独塔曲

线钢箱梁斜拉桥不平衡水平转体法施工进行施工控制研究,结果表明,成桥后监测的主梁线形与斜拉索索力均满足规范要求。李睿智等^[13]采用有限元对独塔单索面曲线斜拉桥结构主梁局部截面转角较大问题进行研究,并提出了三种解决方案。梁青山^[14]、张二华等^[15]以实际工程桥梁为背景,通过建立桥梁施工全过程空间有限元模型,对曲线斜拉桥施工过程中的力学行为进行研究。

综上所述,目前对于大曲线半径($R \geq 200$ m)车行曲线斜拉桥的静力性能分析已有很多,但对于复杂异型的小半径独斜塔环形主梁人行斜拉桥的静力性能分析不足,且缺乏对其建造精度控制的相关研究。因此对复杂异形小半径曲线斜拉桥结构进行受力分析及施工监测具有十分重要的现实意义。

1 工程概况

以某景观人行桥为工程背景,其主体结构为中置斜桥塔、环形桥面,塔高 38.55 m,桥面呈环形环抱主塔,中心线半径 11.27 m,总长 72 m。

环形桥面系采用竹木铺装,内侧布置主钢箱梁外侧悬挑梁的结构形式。其中,内侧主箱梁结构高 0.7 m,桥面净宽为 1.503 m;悬挑梁根部截面高度为 0.5 m,端部截面高度为 0.1 m,桥面净宽为 2.497 m,桥面总宽为 4 m,如图 1(a)所示。同时在悬挑梁中部及端部布置两道环形梁。

桥面系按每 7.5° 一个节段,共划分为 48 个节段,如图 1(b)所示,支承于斜柱并通过 9 根 70 mm 不锈钢悬挂索与主梁内侧和桥塔相连,于桥面主梁一侧沿悬挂索轴线额外布置两根直径 70 mm 不锈钢缆风稳定索锚固于基础,悬挂索按对称布置方式,由 A 点向两侧每 30° 布置一根。

桥塔底部大顶部小,底部与基础刚接,采用组合截面与基础刚接;顶部与背索、悬挂索连接,采用钢箱形截面,其中三根直径 70 mm 不锈钢斜拉背索锚固于基础。

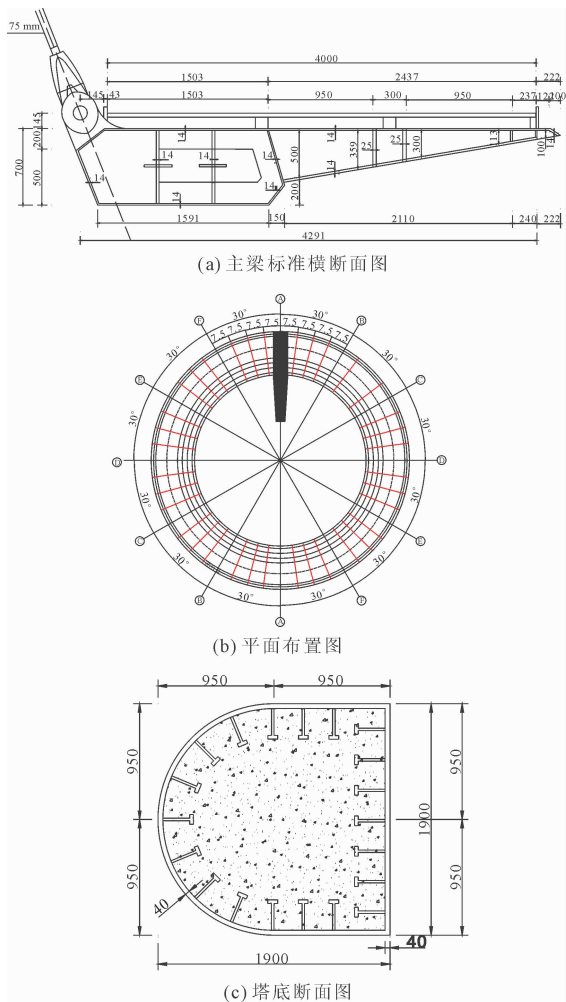


图 1 人行桥构件断面图(单位:mm)

2 有限元模型的建立与验证

2.1 有限元模型的建立

采用桥梁专业软件 midas/Civil 建立该斜塔环梁人行斜拉桥的三维空间有限元计算模型。材料特性见表 1, 主梁为 Q390 钢材, 主塔下部 1/2 长度为钢管混凝土组合截面, 内部填充 C60 混凝土, 上部 1/2 长度为钢截面, 拉索直径为 70 mm 的不锈钢螺旋钢绞线。

采用梁单元模拟主塔、主梁、承台和桩基, 以仅受拉桁架单元模拟拉索, 该桥结构共 339 个节点, 414 个单元。桥面铺装采用竹木结构, 荷载设定为 0.3 kN/m^2 ; 同时, 参照《城市人行天桥与人行地道技术规范》^[16] (CJJ 69—95) 得出该桥人群荷载为 4.67 kN/m^2 。此外, 定义圆心-主梁截面连线与结构对称轴平面之间的夹角为 α , 以塔梁固结截面为初始平面, 顺时针转动 $0 \sim 180^\circ$ 为右半圆, $180 \sim 360^\circ$ 为左半圆, 如图 2 所示。

表 1 模型材料特性表

构件	材料	弹性模量 E/MPa	泊松 比 μ	线膨胀系 数/ $\times 10^{-5}$	容重 ρ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
主梁/主塔 (钢)	Q390	2.06×10^5	0.3	1.2	78.5
主塔 混凝土	C60	3.60×10^4	0.2	1.0	25.0
拉索	不锈钢索	1.30×10^5	0.3	1.2	80.9
桩基	C35	3.15×10^4	0.2	1.0	25.0
承台	C40	3.25×10^4	0.2	1.0	25.0

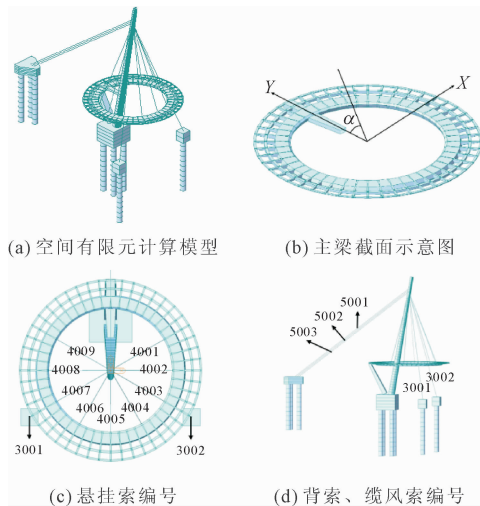


图 2 斜塔环梁人行斜拉桥空间有限元计算模型

2.2 模型准确性验证

为确保采用 midas/Civil 软件对本人行桥建模的准确性, 采用 OpenSEES 软件建立该桥的有限元模型以相互对比验证, 全桥模型如图 3 所示。其中, 全桥沿局部坐标轴纵向的单元数量和节点数量与 midas/Civil 模型相同, 主梁和主塔采用非线性梁柱单元模拟, 对截面进行纤维划分, 箱梁截面钢材厚度方向划分 5 个纤维单元, 长度方向划分 10 个纤维单元; 中环梁和边环梁截面钢材厚度、长度方向均划分 10 个纤维单元。斜拉索根据 Ernst 公式等效拉索弹性模量以考虑拉索松弛和屈服, 从而考虑拉索垂度效应。

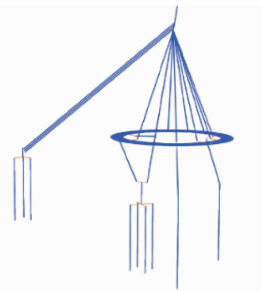


图 3 全桥有限元模型

对主塔塔底截面的轴力与弯矩、各桩基底反力、主梁跨中弯矩和竖向位移、塔梁固结处弯矩作为关键截面静力响应结果进行对比,如表 2 所示,两种模

型计算结果对比的偏差均小于 10%,表明两种建模方法相互校核的准确性。

表 2 模型静力计算结果对比

恒载工况	关键截面							
	主塔塔底		缆风索		背索桩基	主梁跨中		塔梁固结
	轴力 /kN	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	基底反力 /kN	基底反力 /kN	基底反力 /kN	位移 /mm	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)
midas	-3920.2	-395.7	-9738.1	-1910.8	-3107.2	-9.9	-258.7	-118.1
OpenSEES	-4178.4	-428.7	-10197.0	-1879.4	-2988.1	-9.3	-271.7	-127.2
相对误差/%	6.6	8.3	4.7	-1.7	-3.9	-6.5	5.1	7.7

3 斜塔环梁人行斜拉桥受力性能分析

3.1 应力分析

恒载作用下桥梁关键构件应力如图 4 所示,箱形主梁在恒载作用下受压,中环梁和边环梁均受拉,且主梁所受应力沿着桥梁的对称平面对称分布。箱梁、中环梁、边环梁均在塔梁连接处达到应力最大值,分别为 -19.3 、 19.4 、 13.6 MPa(正号表示受拉,负号表示受压,下同)。主塔整体受压,应力自塔顶至塔底呈现先增大后减小再增大的变化趋势。在塔高 $h = 33.42$ m 处由于悬挂索集中锚固在主塔上,使该处的应力出现突变而达到应力极值,为 -19.5 MPa。在塔高 $h = 10.45$ m(塔梁固结处),主梁与主塔的协同受力导致应力曲线出现拐点,因此该区域出现明显的先增大后减小的应力变化趋势。拉索在恒载作用下的应力极值出现在 $\alpha = 120^\circ$ 和 $\alpha = 240^\circ$ 位置,这两个关键位置是悬挂索与缆风索共同锚固于箱梁的区域,拉索应力出现最大值为 96.8 MPa。

恒载和人群荷载作用下桥梁关键构件应力响应如图 5 所示,主梁和主塔应力变化趋势与仅有恒载作用的工况相同,箱梁整体处于受压状态,在拉索锚固处仍表现出明显的应力集中现象,特别是在缆风索锚固位置,压应力可达 -50.0 MPa,三主梁均在塔梁连接处达到应力最大值,分别为 -51.0 、 39.9 、 26.6 MPa。

在塔高 $h = 33.42$ m 即悬挂索在主梁的锚固点处达到应力极值为 -25.1 MPa,在主塔钢管截面变化为钢混组合截面的位置,由于截面刚度的突变导致应力由 -15.6 MPa 变化为 -8.31 MPa,变化幅度达到了 46.7% 。

拉索的应力极值出现位置与恒载作用下相同,拉索应力值为 108.5 MPa。同时,对比恒载工况下,

此时两根缆风索的应力值下降,这是由于缆风索主要平衡主塔的水平位移,当施加人群荷载时主梁下挠导致背索拉力增大,荷载更多通过背索传递至基础。

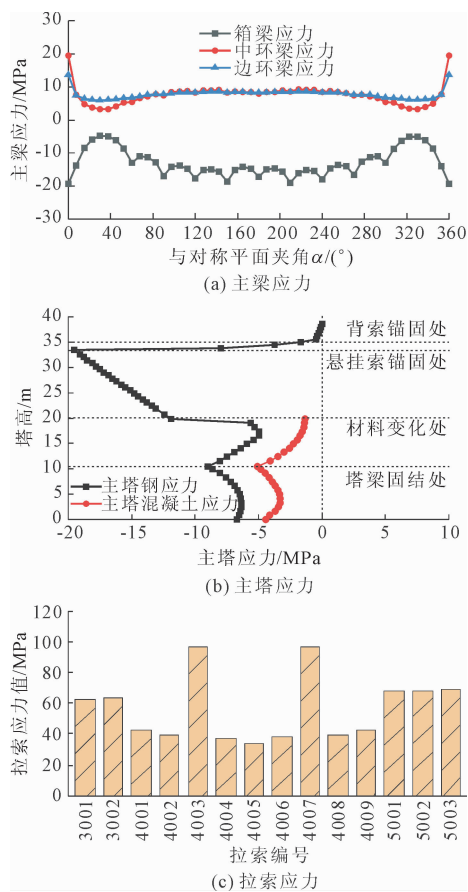


图 4 恒载作用下桥梁关键构件应力图

3.2 位移分析

恒载作用下主梁及主塔位移如图 6 所示,恒载作用下,主梁位移呈现对称分布,最大位移发生在边环梁上夹角 $\alpha = 180^\circ$ 处,为 -9.98 mm。主塔的 X 方向位移呈现沿着塔高增加逐渐增加的趋势,在塔顶达到极值为 -0.15 mm, Y 方向位移呈现沿着塔高增

加先增大后减小的变化趋势,在塔高 $h = 26.65 \text{ m}$ 处达到最大值为 -3.58 mm 。

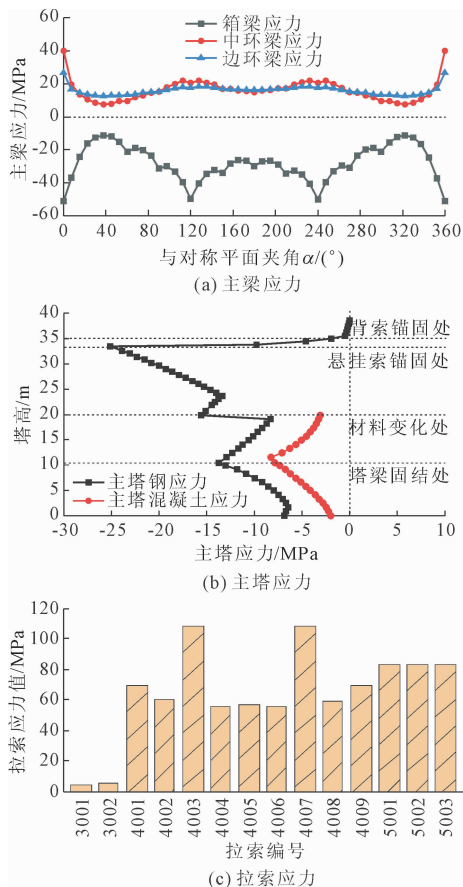


图 5 恒载和人群荷载作用下桥梁关键构件应力图

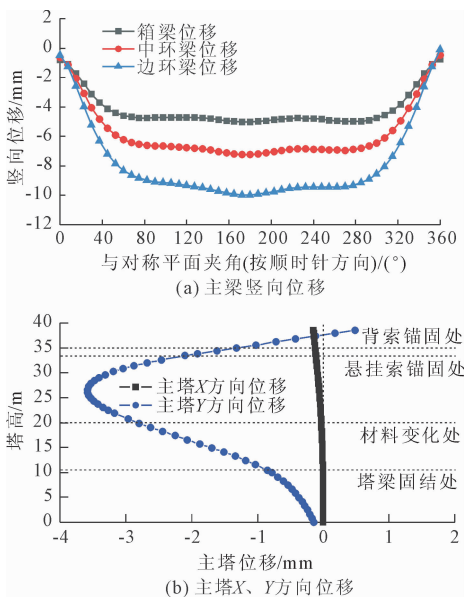


图 6 恒载作用下主梁及主塔位移图

在恒载和人群荷载作用下,主梁和主塔位移变化趋势如图 7 所示,恒载与人群荷载共同作用下,从

塔梁固结处向跨中位移幅值逐渐增大,最大位移发生在边环梁夹角 $\alpha = 180^\circ$ 处,为 -29.62 mm 。主塔在 X、Y 两个方向的位移均呈沿着塔高增加而增大的变化趋势。由于整体坐标 Y 轴为桥梁对称轴方向,主塔抗弯刚度在该方向相对较弱,主塔 Y 方向的位移最为显著,在塔顶处达到最大值为 -10.11 mm 。

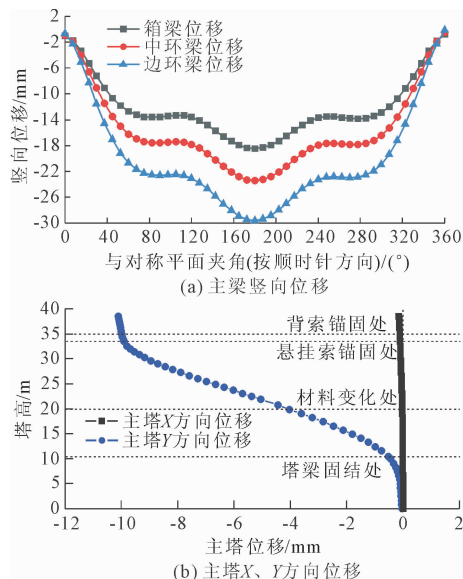


图 7 恒载和人群荷载作用下主梁及主塔位移图

4 施工监测控制

4.1 桥梁监测阶段划分

为了确保主桥在施工过程中结构受力和变形始终处于安全范围内,且成桥后的主梁和主塔内力和线形符合设计要求,在主桥施工过程中必须进行严格的施工监控。本桥采用先主塔后主梁的施工方,在每一重点施工阶段的前后均需对桥梁结构的变形、应力等关键指标进行测量,并与理论值进行对比,确保施工过程的安全性与稳定性。施工阶段具体划分如表 3 所示。

4.2 主梁线形监测

分别在钢箱梁吊装及桥面铺装施工完成后,进行主梁线形监测。因主梁质量主要集中于内侧钢箱梁,且外侧环梁保证了桥面的横向整体性,因此将桥面高程测点布设于关键的拉索锚固点,足以实现对全桥线形的有效控制,测点布置如图 8 所示,桥面拉索锚固点测量结果对比如图 9 所示。由图 9(a)主梁高程对比可知,C1—C9 号拉索锚固点的偏差分别为 -9 、 -5 、 -7 、 -22 、 1 、 8 、 -14 、 -8 、 0 mm ,C4 及 C7 索梁端锚固点高程偏差超过允许值,需在后续的桥面铺装阶段进行调整。在桥面铺装后再次对主梁高程进

行监测,如图 9(b)所示,与主梁理论高程相比,各测点高程偏差在 14 mm 以内,满足精度控制要求。

表 3 桥梁主要施工阶段监测

阶段号	关键施工阶段	监测内容
1	背索及缆风稳定索预埋件	定位精度
2~4	主塔第一节段、斜柱节段及斜柱节段填充混凝土	焊接前、后塔柱节段轴线;填充混凝土后塔柱节段轴线
5	主塔支架拆除	塔柱轴线
6	钢箱环梁吊装	主梁高程
7	桥面铺装	主梁高程
8	背索张拉	张拉前塔顶坐标
9	悬挂索张拉	
10	拆除主梁胎架	拉索索力和主塔
11	安装并张拉缆风稳定索	主梁位移及应力
12	TMD 安装	

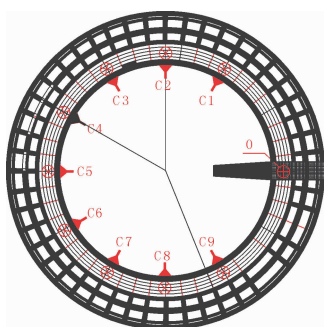
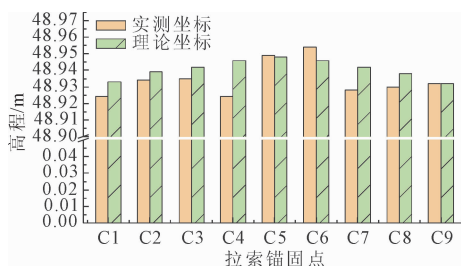
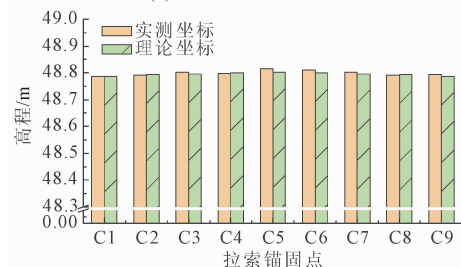


图 8 桥面高程测点布置示意图



(a) 吊装完成后主梁高程对比



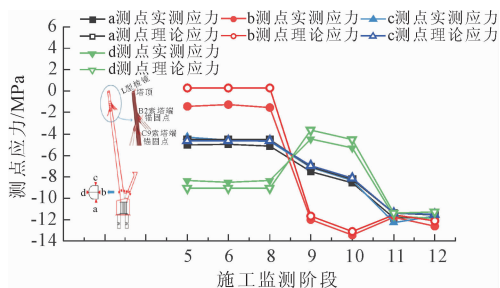
(b) 桥面铺装后主梁高程对比

图 9 主梁拉索锚固点实测坐标与理论坐标对比

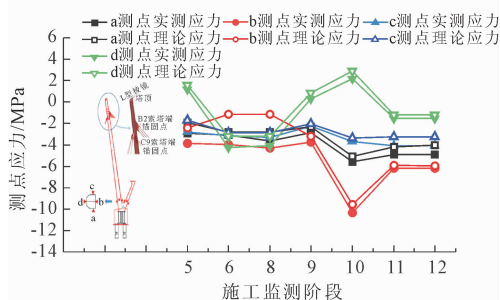
4.3 主塔监测

对关键施工阶段中的第 5、6、8、9、10、11、12 阶段的主塔应力进行监测,重点关注主塔根部截面和斜柱根部截面共八个应力点的数据,分别为 a、b、c、

d 点(a、c 为截面的上下侧,b、d 为截面的前后侧),如图 10 所示。可以看出,主塔根部截面和斜柱根部截面的应力变化趋势与理论计算值基本吻合,各测点的实测应力均在设计允许范围内,且具有一定的应力储备,表明结构受力合理,未出现异常应力集中现象。此外,主塔在施工过程中的变形量也处于可控范围,未发生超出预期的偏位或沉降。综合应力监测和变形观测结果,可以判定主塔结构在整个施工过程中均处于安全稳定的状态。



(a) 主塔根部截面应力



(b) 斜柱根部截面应力

图 10 主塔根部截面和斜柱根部截面应力对比

4.4 拉索索力监测

在桥面铺装施工完成后,桥梁结构进入斜拉索体系调整的关键阶段。为确保成桥状态下的受力合理性和结构安全,张拉过程中,采用高精度传感器实时监测拉索索力,确保索力施加的准确性和均匀性,避免因张拉不同步导致主梁或主塔受力不均,如图 11 所示,斜拉索索力在不同施工阶段呈现动态变化,但悬挂索与背索的拉力实测值与理论值偏差均在 $\pm 10\%$ 以内,在最终成桥态索力差距在 $\pm 5\%$ 以内,满足精度要求。

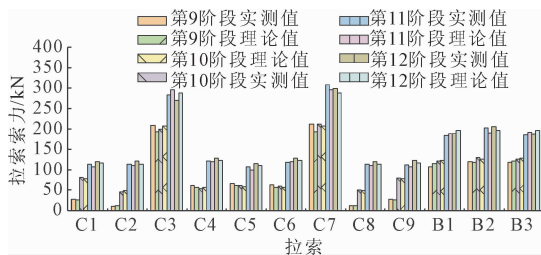


图 11 拉索索力对比

5 结 论

(1) 斜塔环梁人行斜拉桥在恒载和人群荷载作用下, 环形主梁受力具有很强的空间性, 其与恒载作用相比, 主梁与主塔的受力趋势大致相同, 应力和位移最大值有所增大。

(2) 主梁在拉索锚固点及塔梁连接处出现明显的应力集中, 箱梁受压, 边环、中环梁受拉, 恒载作用下在塔梁连接处达到应力最大值, 分别为 -19.3、19.4、13.6 MPa; 恒载和人群荷载共同作用下分别为 -51.0、39.9、26.6 MPa。主塔应力沿高度变化复杂, 在索锚固区和截面突变处出现应力重分布, 整体处于受压状态。

(3) 施工监测数据表明, 成桥过程中主梁线形、主塔应力及拉索索力的实测值与理论值吻合良好, 偏差均处于控制精度范围内, 说明施工控制措施有效, 结构最终成桥状态符合设计要求。

参考文献:

- [1] 陈明宪. 斜拉桥的发展与展望[J]. 中外公路, 2006(4): 76-86.
- [2] 范伟强. 独塔曲线混合梁斜拉桥索力优化及索力调整研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [3] 贾伟红, 张志平, 苏凡. 人行斜拉桥力学性能及舒适度分析[J]. 公路, 2019, 64(7): 174-178.
- [4] 刘世明, 赵顺波, 李晓克. 大跨人行异型斜拉桥静、动力及抗震性能分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(4): 45-50.

- [5] 林杰, 欧阳泽卉, 刘新华, 等. 小边跨曲线混凝土独塔斜拉桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2025, 53(5): 1-8.
- [6] 林杰, 高建丽. 大跨度独塔斜拉桥静力计算分析[J]. 中国水运, 2022, 22(4): 125-128.
- [7] 佟志峰, 熊雷, 刘小奇, 等. 单索面独塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 47-52.
- [8] 罗雷, 李凯. 异型桥塔斜拉桥施工过程仿真与监测[J]. 建材世界, 2018, 39(5): 70-74.
- [9] 汪高斯. 地锚式单跨独塔斜拉桥受力特点研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 1-6.
- [10] 祝嘉翀, 黄天立, 周朝阳, 等. 高铁大跨拱承式独塔斜拉桥成桥状态力学参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2244-2254.
- [11] 刘本永. 主跨 165 m 单线铁路独塔混合式结合梁曲线斜拉桥设计[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(6): 84-89.
- [12] 陈锋, 李新伟, 李泽露, 等. 跨京广铁路信阳编组场大桥施工控制关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(4): 50-56.
- [13] 李睿智, 王立彬, 李建慧. “月牙形”独塔曲线斜拉桥成桥计算及结构优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2023-2033.
- [14] 梁青山, 刘海龙. 小半径曲线斜拉桥适应性研究[J]. 公路, 2017, 62(8): 151-155.
- [15] 张二华, 单德山, 周泳涛. 大跨曲线斜拉桥 II 形主梁分析方法研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(5): 44-48.
- [16] CJJ 69—95 城市人行天桥与人行地道技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.

(上接第 8 页)

- [11] Sheen Y N, Zhang Lihao, Le D H. Engineering properties of soil-based controlled low-strength materials as slag partially substitutes to Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 822-829.
- [12] Kaliyavaradhan K S, Ling Tungchai, Guo Mingzhi, et al. Waste resources recycling in controlled low-strength material (CLSM): A critical review on plastic properties[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 383-396.
- [13] 林文逸, 方祥位, 雷运涛, 等. 流态固化淤泥复合胶凝材料配比优化及其固化机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-11. [2026-03-10] <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241101.1140.002>.
- [14] JHS A313-1992 エアモルタル及びエアミルクの試験方法[S]. 东京: 日本道路公团, 1992.
- [15] 谢建海, 亢虎宁, 赵党会. 脱硫石膏的性能及其作为

- 水泥缓凝剂的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(5): 16-18.
- [16] 晁军. 碱渣-石膏-水泥联合固化粉土的力学特性及微观机理研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36(4): 98-105.
- [17] He Jun, Zhou Lirong, Zhang Lei, et al. Effect of curing temperature on the geotechnical behavior of solidified sludge in landfill temporary cover applications[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(4): 1569-1578.
- [18] 杨康辉, 欧忠文, 肖寒冰, 等. CCCW 对硫铝酸盐水泥固化土强度的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(1): 83-87.
- [19] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2794-2800.