

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.05.020

引用格式:马文荣,陈学江,胡超,等.毕节倒天河斜塔斜拉桥的总体设计[J].公路与汽运,2024,40(5):113-118.

Citation:MA Wenrong, CHEN Xuejiang, HU Chao, et al. Overall design of Daotianhe Leaning Tower Cable-stayed Bridge in Bijie[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(5): 113-118.

## 毕节倒天河斜塔斜拉桥的总体设计\*

马文荣, 陈学江, 胡超, 徐勇

(中铁八局集团 第三工程有限公司, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 毕节倒天河大桥为 90 m + 130 m 不对称斜塔斜拉桥, 桥塔采用倾斜式钢筋混凝土 A 形塔, 截面形式为双变截面矩形断面, 桥塔基础采用钻孔灌注桩; 主梁采用双肋  $\pi$  形预应力混凝土梁板结构; 斜拉索呈扇形布置, 采用塑包平行钢丝索, 外层护套表面设置螺旋线以抑制风雨振。文中介绍毕节倒天河大桥的跨径布置及主梁、桥塔、斜拉索设计, 采用有限元软件对主桥进行整体与局部结构静力和动力计算, 结果表明在施工阶段及运营阶段, 桥梁的承载能力、抗裂性能、刚度、抗震性能均满足设计和规范要求, 具有良好的静力、动力性能。

**关键词:** 桥梁; 斜塔斜拉桥; 总体设计; 结构计算; 静动力分析

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)05-0113-06

斜拉桥造型优美, 跨越能力强, 已在公路、铁路和城市桥梁建设中得到广泛应用。索塔作为斜拉桥的主要传力结构, 可分为直塔与斜塔两种形式。直塔斜拉桥可采用悬臂对称施工, 通过端锚索控制索塔偏位<sup>[1]</sup>。若将索塔倾斜布置, 可利用索塔质量来平衡主梁重力。因此, 国内外陆续建造了多种形式独斜塔斜拉桥。佟志峰等研究了单索面斜塔斜拉桥桥塔关键设计参数, 分析了主动顶推力大小和角度、主梁配重及拉索张拉力等参数对桥塔、支撑受力性能的影响<sup>[2]</sup>。虞子楠研究了地锚式折塔斜拉桥结构体系参数, 分析了不同桥塔形式、不同桥塔倾角斜拉桥的整体结构力学行为<sup>[3]</sup>。赵煜等研究了地锚式万向铰独斜塔斜拉桥的温度效应<sup>[4]</sup>。相比于直塔斜拉桥, 斜塔斜拉桥受力更复杂, 施工难度更大。本文结合不对称斜塔斜拉桥工程实例进行斜塔斜拉桥受力分析, 为同类桥梁建设提供参考。

### 1 工程概况

毕节倒天河大桥位于毕节市七星关区德溪东北片区, 跨越月亮湖公园。桥梁结构形式为不对称半漂浮体系斜塔斜拉桥, 桥塔采用倾斜式 A 形塔, 主塔中心线纵桥向倾角为  $75^\circ$ , 横桥向倾角为  $78^\circ$ , 桥塔竖向高度为 71 m。塔柱横桥向宽度为 3.600 ~

5.000 m, 顺桥向宽度为 5.200 ~ 9.173 m, 下塔柱从底部往上采用半径 36 m 的圆弧形(见图 1)。



图 1 毕节倒天河大桥建成效果

桥址区属于碳酸盐岩分布区, 为溶蚀中低山 + 河流侵蚀堆积地貌。场区内地面标高为 1 450.0 ~ 1 447.2 m, 最大高差为 2.8 m, 地形起伏较小, 场地较平整。桥梁位于河谷地带, 河床宽度为 15 ~ 26 m, 河床纵坡较缓。河水流量受大气降水影响明显, 上游汇水面积大, 遇暴雨或特大暴雨时河流水位上涨快, 表现出季节性河流特征。地下水主要为黏土层中的上层滞水、卵石土层中孔隙水、基岩中岩溶裂隙水及岩溶管道水, 富水性较强。

桥址区地质构造极为发育, 岩溶发育类型为下伏基岩三叠系中统关岭组第二段灰岩, 岩心可见溶迹现象多, 基岩面稍有起伏。现场施工钻孔共计 130 个, 发现岩溶洞隙 129 个, 且多为间断性溶隙,

\* 基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 026)

少部分呈串珠状,属于岩溶强发育地段。其特征如下:1)岩溶主要沿岩体垂直节理发育,以垂直形态为主,发育宽度一般不大,但深度较大。平面发展与展布方向受节理方向控制。当两组溶蚀裂隙相互交错时,彼此渗透连通在岩体中形成网格通道,形成较大深度的溶蚀洞隙。2)岩体中岩溶洞隙一般由可塑或软塑黏土填充,表现为深度越大、标高越低,内部充填物状态越软。根据钻孔资料,部分钻孔溶洞顶板较厚。从经济性比较,使用溶洞顶板作为基础持力层比揭穿溶洞更合理。但基础周边存在岩溶洞隙,有临空面存在,基础水平方向稳定性存在安全隐患,不宜采用溶洞顶板作为持力层。

桥址处及周边无断层通过,现状无滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,场地稳定性良好。桥位岩溶发育区未发生过塌陷,自然条件下整体稳定性较好。

## 2 主要技术标准

- (1) 道路等级:城市次干路。
- (2) 设计行车速度:40 km/h。
- (3) 桥梁设计基准期:100 年。
- (4) 荷载标准:城-A 级;人群荷载:3.5 kN/m<sup>2</sup>;风荷载:26.3 m/s。
- (5) 安全等级:一级;结构安全系数:1.1。
- (6) 环境条件:I 类。
- (7) 抗震等级:震动峰值加速度为 0.05g,按Ⅵ度设防。
- (8) 桥面纵坡:-0.769%。
- (9) 桥面横坡:桥面车行道设 1.5%的双向横坡,人行道设 2%的单向横坡。

### 3 结构设计

### 3.1 跨径布置

桥跨布置为 90 m + 130 m。主梁与桥塔、桥台之间分别设竖向抗压支座,结构特点为半漂浮体系。下部结构主塔采用矩形承台 + 桩基础,承台尺寸为 23.9 m × 47.4 m × 4.0 m,采用 C40 混凝土。桩基为钻孔灌注桩,桩径为 1.5 m、1.8 m,共 45 根桩。采用重力式 U 形桥台,尺寸为 8.9 m × 26.0 m × 2.5 m,基础为直径 1.8 m 钻孔灌注桩,左右桥台均设置 20 根桩。

桥梁起点里程为 K0+072.5, 终点里程为 K0+305.5, 全长 233 m。桥面宽度为 27.4 m, 设置为 5.0 m 人行道+1.2 m 拉索保护区+15.0 m 车行

道+1.2 m 拉索保护区+5.0 m 人行道。桥梁立面布置见图 2。

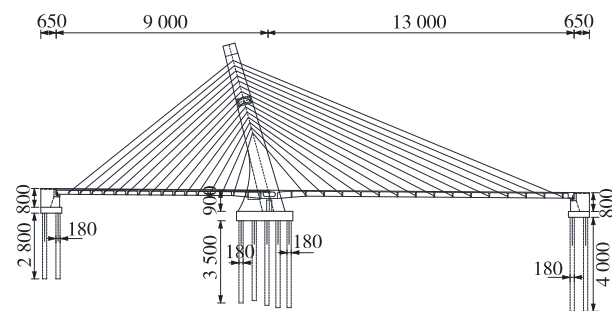


图 2 毕节倒天河大桥立面布置(单位:cm)

### 3.2 主梁

主梁为双肋  $\pi$  形梁板结构,采用预应力混凝土。主梁截面宽度为 27.4 m,梁高 2.4 m,主跨桥面板厚度为 32.0 cm,双主梁梁肋宽度为 1.8 m。辅跨桥面板厚度为 75.0 cm,主梁梁肋宽度为 5.1 m。桥面铺装层厚度为 10 cm,采用沥青混凝土,上层为 6 cm 厚 AC-16 中粒式沥青混凝土,下层为 4 cm 厚 SMA-13 沥青玛蹄脂。主梁拉索区分隔护栏布置在拉索两侧,全桥共设置 4 道,在主梁上通长布置。拉索锚固处设横隔梁,梁高 2.35 m,辅跨横隔梁宽 1.0 m,主跨横隔梁宽 0.3 m。辅跨桥面板外悬臂长 3.05 m,主跨桥面板外悬臂长 4.70 m。横桥向塔柱内侧采用主梁和塔柱分离体系,通过设置在 0<sup>#</sup> 块主梁横梁下侧和水平侧的支座将竖向力传递给与承台固结的支撑墩,将水平不平衡力传递给与塔柱内侧固结的牛腿。

### 3.3 桥塔

索塔采用倾斜式 A 形塔,断面形式为双变截面矩形断面,桥塔构造见图 3。主塔高 71 m,其中主梁顶面以上高 62 m。由于跨径布置不对称,边、中跨结构存在内力不协调。因此,利用桥塔倾斜平衡主跨大于边跨引起的结构不利影响<sup>[5]</sup>。在纵桥向,桥塔向辅跨侧倾斜,与水平面成  $75^{\circ}$ ;在横桥向,双塔柱内收,与水平面的夹角为  $78.4^{\circ}$ 。塔顶截面尺寸为 5.200 m(顺桥向) $\times$ 3.600 m(横桥向),塔底截面尺寸为 20.000 m(顺桥向) $\times$ 5.935 m(横桥向)。顺桥向主塔截面尺寸渐变,横桥向采用等截面。为了使塔柱与主梁、斜拉索受力合理、拉索定位方便并降低工程造价,选用箱形截面的塔柱构造形式。除底部塔柱 10.6 m 高范围为实体段外,其余均采用箱形截面<sup>[6-7]</sup>。纵桥向塔壁厚 1.3 m,横桥向塔壁厚 0.7 m,塔壁之间设置 0.6 m $\times$ 0.3 m 倒角。塔柱中横梁采

用箱形截面,尺寸为 5.8 m(宽) $\times$ 3.2 m(高)。中横梁为预应力混凝土结构,共设置 12 根 15 孔  $\phi 15.2$  mm 预应力钢束。为满足塔柱与横梁间传力需求,中横梁的纵向钢筋锚固于塔柱内,纵向预应力锚固于塔柱外侧。顶横梁采用实心梯形截面,与塔柱形成整体。在塔柱锚索区,塔柱内壁设置拉索锚块。为平衡斜拉索的水平分力,在锚索区范围内布置直线加环向预应力束<sup>[8-9]</sup>。由于环向预应力束的弯曲半径较小,沿钢束曲线径向布置防劈裂钢筋,防止内侧混凝土开裂。预应力管道采用塑料波纹管,采用真空辅助法进行管道压浆。塔柱竖向布置  $\phi 16$  mm 钢筋。为增强塔柱混凝土外表面抗裂性能,在外侧钢筋保护层内增设一层直径  $\phi 8$  mm 带肋钢筋焊接网,网格尺寸为 10 cm $\times$ 10 cm。索塔外侧板向下倾斜 3°,设置  $\phi 100$  mm PVC 管作为通气孔。

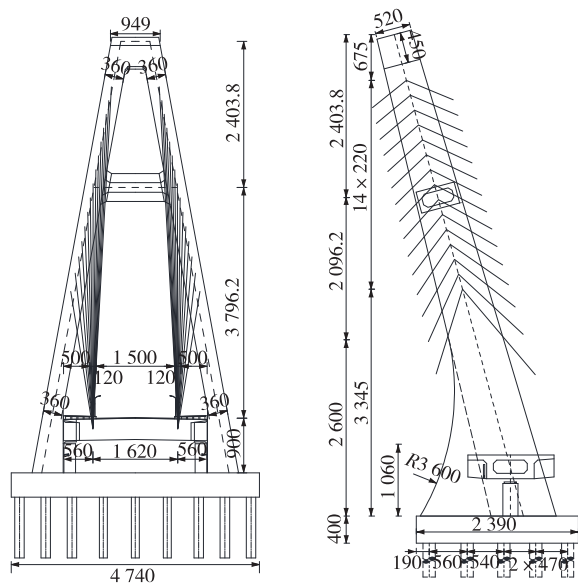


图 3 毕节倒天河大桥塔构造图(单位:cm)

### 3.4 斜拉索

该桥为双索面斜拉桥,斜拉索布置在主梁两侧,位于车行道与人行道之间,呈扇形布置,主跨、边跨各设置 15 对索,全桥共设置 60 根索。由近塔端向四号路北侧拉索依次编号为 SC1~SC15,向东二路侧编号为 MC1~MC15。根据索力不同,斜拉索分为 5 种规格,分别为 PES7-139、PES7-163、PES7-187、PES7-211、PES7-241。拉索在主梁主跨的布置间距为 7.8 m,在边跨的间距为 5.0 m。最大索长 152.4 m,最大索质量 14.2 t,拉索倾角为 22°~73°。拉索锚固于主梁肋板底部,在主塔上的竖向锚固间

距为 2.2 m。斜拉索采用塑包平行钢丝束,钢丝采用  $\phi 7$  mm 镀锌高强钢丝,抗拉强度为 1 770 MPa,屈服强度为 1 580 MPa,松弛率低于 2.5%。

斜拉索设计寿命为 30 年,活载应力幅值控制在 200 MPa 以内。为防止斜拉索出现风雨振和涡振导致的疲劳破坏,在索体外表面设置双螺旋线,并在拉索两端设置减振装置<sup>[10]</sup>。为保护拉索,采用高密度聚乙烯双层护套防腐,护套拉伸强度为 25 MPa,屈服强度为 15 MPa,断裂伸长率为 400%。拉索锚固体采用冷铸锚锚具,按照拉索的公称破断索力,分别编号为 PESM-9500、PESM-12750、PESM-14400、PESEM-17250,在塔端张拉、梁端锚定。

## 4 结构静力分析

### 4.1 有限元模型

采用 MIDAS/Civil 2021 软件进行全桥整体计算,图 4 为主桥有限元模型,模型共包括 1 302 个节点,1 116 个单元。主梁采用纵、横梁格模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟,桥塔、主梁、承台、基础均采用梁单元模拟。主塔塔柱与主梁均采用 C55 混凝土,承台采用 C40 混凝土,桩基采用 C30 混凝土。预应力钢束采用公称直径为 15.2 mm 预应力钢绞线,标准强度为 1 860 MPa,管道摩阻系数为 0.20,管道偏差系数为 0.001 5。斜拉索采用平行钢丝,标准强度为 1 770 MPa。静力计算中按施工流程分阶段建立模型,按规范要求对结构施工阶段和成桥阶段进行验算。桥墩、桥塔、斜拉索均按实际尺寸建立,计算模型分阶段考虑施工过程,考虑拉索、主梁、桥塔的共同作用,分别计算恒载、活载、预应力、收缩徐变、汽车荷载、人群荷载、温度作用、风荷载、不均匀沉降下荷载效应。

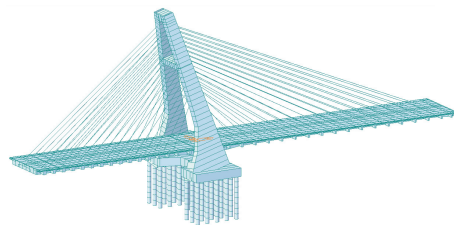


图 4 主桥有限元模型

### 4.2 主梁验算

主梁验算内容包括承载力验算、抗裂验算、应力验算<sup>[11]</sup>,其中抗裂验算采用频遇组合,压应力验算采用标准组合。验算结果(见表 1、表 2)显示:主梁



承载能力极限状态下正截面承载力最小安全系数为 1.14, 频遇组合下主梁最小压应力储备为 1.30 MPa, 标准组合下主梁最大压应力为 16.63 MPa, 均满足规范要求, 主梁安全性能得到保障。

表 1 主梁正截面承载力验算结果

截面位置/m	主梁正截面弯矩/(kN·m)		安全系数
	计算值	容许值	
X=0	313 094	432 766	1.38
X=-30	18 305	23 064	1.26
X=-60	107 951	133 859	1.24
X=-90	28 784	33 389	1.16
X=30	51 378	94 022	1.83
X=60	33 245	58 511	1.76
X=90	91 301	122 343	1.34
X=130	11 940	13 612	1.14

注: X=0 代表有限元模型的坐标原点。

表 2 主梁抗裂与压应力验算结果

截面位置	抗裂验算结果/MPa		压应力验算结果/MPa	
	计算值	容许值	计算值	容许值
主梁上缘	-1.30	0	-16.52	-17.75
主梁下缘	-1.82	0	-16.63	-17.75

#### 4.3 桥塔验算

根据计算结果, 桥塔有两个最危险的截面, 一个是塔柱渐变起点处截面(距塔底 10.6 m 处), 另一个是与中横梁相交的塔柱截面(距塔底 47.0 m 处)。根据承载能力验算结果, 渐变处截面最小安全系数为 3.5, 与中横梁相交的塔柱截面最小安全系数为 2.7。塔柱抗裂计算结果显示: 最大裂缝宽度为 0.169 mm, 小于 0.200 mm, 满足规范要求<sup>[12]</sup>。

#### 4.4 斜拉索验算

斜拉索承载力应满足下式:

$$\gamma_0 N_d / A \leq \varphi_d f_d$$

式中:  $\gamma_0$  为结构重要性系数;  $N_d$  为斜拉索轴向拉力设计值;  $A$  为斜拉索截面面积;  $\varphi_d$  为斜拉索修正系数, 取 1.0;  $f_d$  为斜拉索抗拉强度设计值, 根据 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》, 该桥  $f_d=955$  MPa。

根据计算结果, 斜拉索运营阶段标准组合下最大应力为 702 MPa, 安全系数为 1.36, 满足规范要求<sup>[13]</sup>。

斜拉索疲劳计算采用疲劳荷载模型 I, 平行钢丝斜拉索应力幅值不大于 200 MPa。经计算, 拉索最大应力幅值为 60 MPa, 小于规范容许值, 结构受力安全。

#### 4.5 塔柱拉索锚固区验算

采用 FEA(Finite Element Analysis) 有限元软件建立塔柱精细化有限元模型, 塔柱和横梁采用实体单元模拟。由于结构对称, 为提高计算效率, 取横桥向 1/2 模型进行分析。荷载取自质量+锚固区预应力+最不利索力。锚固区预应力采用植入式钢筋单元, 将预应力钢筋单元与混凝土实体单元进行耦合以共同受力。取最大索力进行验算, 索力以截面压应力的方式加载在混凝土拉索锚垫块上。有限元模型见图 5。

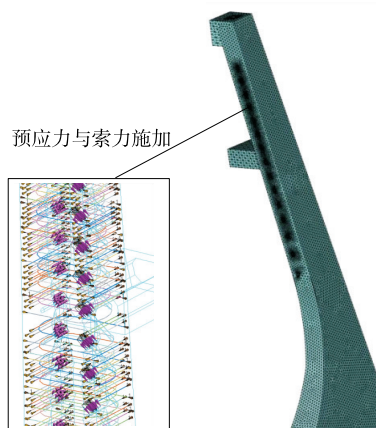


图 5 塔柱有限元模型

拉索锚固区按 A 类预应力构件考虑, 根据 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》, 斜截面混凝土主拉应力  $\sigma_{tp} \leq 0.5 f_{tk} = 1.37$  MPa<sup>[12]</sup>。锚固区主拉应力计算结果见图 6。

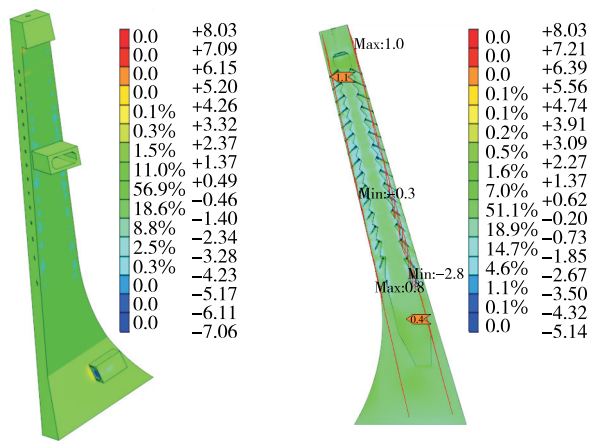


图 6 塔柱主拉应力分布(单位: MPa)

从图 6 可以看出:除 2.5% 区域的主拉应力超过规范容许值 1.37 MPa 外,索塔绝大部分区域的主拉应力满足规范要求。超过规范允许值的主拉应力主要出现在与横梁对应的塔柱角隅、尾索锚固区上缘、辅跨侧索导管处,需对这些位置的局部配筋进行加强,保证塔柱抗裂验算满足要求。

5 结构动力分析

5.1 动力特性

对全桥结构进行动力分析<sup>[14-15]</sup>,结构前 10 阶模态见表 3,前 5 阶振型见图 7。由表 3 可知:结构前 10 阶自振周期为 0.30~1.62 s。对结构成桥状态进行稳定性分析,屈曲稳定安全系数为 11.23,满足规范不小于 4 的要求<sup>[12]</sup>。

表 3 结构前 10 阶模态

阶次	周期/s	频率/Hz	振型描述
1	1.62	0.62	一阶纵漂
2	0.93	1.07	主梁一阶对称竖弯
3	0.74	1.35	主梁一阶反对称竖弯
4	0.57	1.75	主塔横弯
5	0.49	2.04	主梁二阶对称竖弯
6	0.46	2.18	主梁三阶对称竖弯
7	0.42	2.37	主梁一阶横弯
8	0.38	2.62	主梁二阶反对称竖弯
9	0.31	3.21	主梁四阶对称竖弯
10	0.30	3.31	主梁二阶横弯

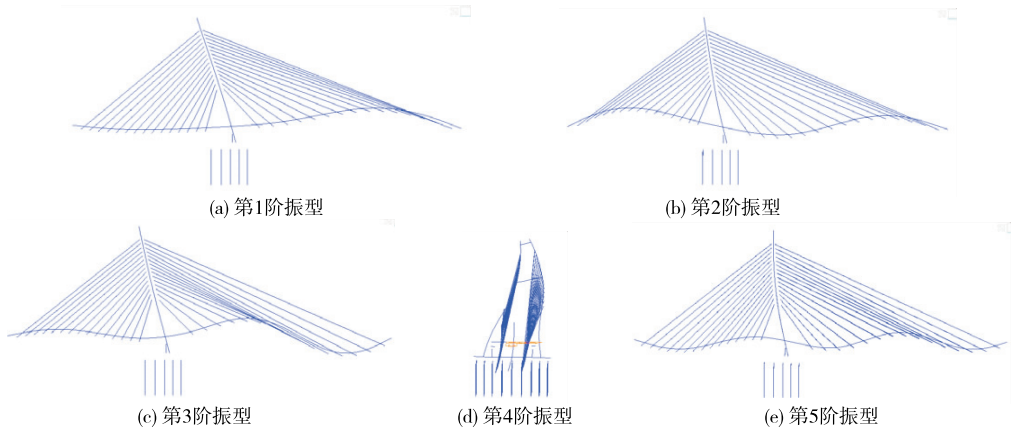


图 7 结构前 5 阶振型

5.2 抗震验算

抗震验算采用反应谱分析,按 JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》进行<sup>[16]</sup>。该桥为 B 类桥梁,分区特征周期为 0.35 s,场地类型为 I 类,设防烈度为 VI 度(0.05g),按照 E2 设计水平进行抗震计算,图 8 为生成的反应谱。采用纵向 X、横向 Y、纵向-横向-竖向(X-Y-Z)3 种地震动输入方式进行验算<sup>[17]</sup>,不同地震工况下塔底截面和桩基截面的强度计算结果见表 4。塔底截面和桩基截面能力值均大于地震作用下需求值,满足要求。

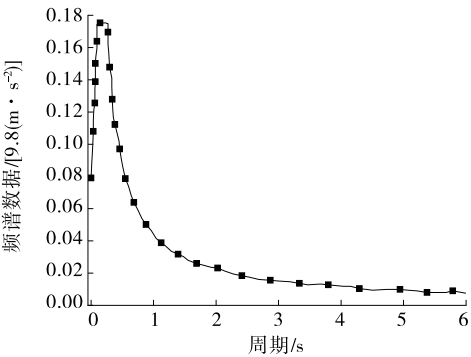


图 8 设计反应谱

表 4 截面强度计算结果

地震动输入方式	截面	P/kN	需求值/(kN·m)		能力值/(kN·m)		安全系数	
			M <sub>Y</sub>	M <sub>Z</sub>	M <sub>Y</sub>	M <sub>Z</sub>	M <sub>Y</sub>	M <sub>Z</sub>
X	塔底	1.53×10 <sup>3</sup>	7.51×10 <sup>3</sup>	1.41×10 <sup>4</sup>	3.07×10 <sup>5</sup>	8.90×10 <sup>5</sup>	40.88	63.12
	桩基	3.27×10 <sup>2</sup>	2.49×10 <sup>2</sup>	2.69×10 <sup>3</sup>	6.36×10 <sup>3</sup>	6.36×10 <sup>3</sup>	25.54	2.36

续表4

地震动输入方式	截面	$P/\text{kN}$	需求值/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$		能力值/ $(\text{kN}\cdot\text{m})$		安全系数	
			$M_Y$	$M_Z$	$M_Y$	$M_Z$	$M_Y$	$M_Z$
Y	塔底	$5.55\times 10^2$	$1.55\times 10^4$	$1.03\times 10^4$	$3.02\times 10^5$	$8.85\times 10^5$	19.48	85.92
	桩基	$9.68\times 10^2$	$3.58\times 10^3$	1.30	$6.70\times 10^3$	$6.70\times 10^3$	1.87	51.53
X-Y-Z	塔底	$2.33\times 10^3$	$9.71\times 10^4$	$1.51\times 10^4$	$8.74\times 10^5$	$2.96\times 10^5$	9.00	19.68
	桩基	$1.93\times 10^3$	$2.91\times 10^3$	$1.87\times 10^2$	$4.80\times 10^3$	$4.80\times 10^3$	1.65	25.67

注: $P$ 表示轴力; $M_Y$ 、 $M_Z$ 分别表示沿单元局部Y、Z轴的弯矩。

地震作用下各截面的位移响应见表5。由表5可知:在地震作用下,各截面竖向位移仅几毫米,可忽略不计;整体位移响应最大为5 cm。结构受力性能满足抗震性能目标要求。

表5 截面位移响应计算结果 单位:m

地震动输入方式	位置	$D_X$	$D_Y$	$D_Z$
X	塔顶	0.003	0.029	0.000
	主梁	0.003	0.000	0.000
	桩顶	0.003	0.028	0.000
Y	塔顶	0.040	0.000	0.001
	主梁	0.038	0.000	0.000
	桩顶	0.038	0.000	0.000
X-Y-Z	塔顶	0.054	0.003	0.006
	主梁	0.053	0.000	0.032
	桩顶	0.038	0.002	0.001

注: $D_X$ 、 $D_Y$ 、 $D_Z$ 分别表示总体坐标系下X、Y、Z轴的位移。

6 结语

毕节倒天河大桥为90 m+130 m斜塔斜拉桥,是连接新老城区的重要通道。桥跨结构体系采用塔、墩固结的半漂浮体系,基础为钻孔灌注桩。有限元计算结果表明桥塔与主梁等关键构件的性能指标均满足规范要求。在桥塔施工过程中,高强高性能混凝土可泵性好,索塔锚固区施工效率高,抗裂等各项质量指标均满足要求。

参考文献:

[1] 王建国,吴正安,周水兴.独塔斜拉桥结构体系与受力分析[J].公路交通技术,2020,36(5):70-75.  
[2] 佟志峰,熊雷,刘小奇,等.单索面独斜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.

[3] 虞子楠.地锚式独塔斜拉桥结构体系参数研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2015.  
[4] 赵煜,张亚军,周勇军,等.地锚式万向铰独塔斜拉桥温度效应分析[J].桥梁建设,2021,51(2):54-61.  
[5] 吴巨军,郑江敏,刘山林.钢管混凝土斜塔斜拉桥设计[J].世界桥梁,2020,48(2):6-9.  
[6] 陈山亭.珠海洪鹤大桥主桥施工关键创新技术[J].桥梁建设,2021,51(6):126-131.  
[7] 刘康,邢惟东,曾远,等.重庆红岩村嘉陵江大桥索塔钢锚箱安装测量定位控制技术[J].世界桥梁,2018,46(4):36-41.  
[8] 刘源,林吉明,董晓兵.秀山大桥桥塔施工关键技术[J].世界桥梁,2020,48(5):26-31.  
[9] 刘新华,舒江,彭元诚,等.独塔斜拉桥索塔交叉锚固区模型试验研究[J].桥梁建设,2019,49(3):40-45.  
[10] 刘庆宽,郑云飞,赵善博,等.螺旋线参数对斜拉索风雨振抑振效果的试验研究[J].工程力学,2016,33(10):138-144.  
[11] 朱朝银,贺国栋,刘榕.G60 醴娄高速公路扩容工程株洲湘江大桥总体设计[J].世界桥梁,2022,50(2):7-12.  
[12] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.  
[13] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路斜拉桥设计规范:JTG/T 3365-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.  
[14] 余国武.3×340 m 公铁同层合建多塔斜拉桥总体设计[J].世界桥梁,2020,48(1):1-5.  
[15] 钟建国,范立朋.某大跨度混合梁斜拉桥模态分析与试验研究[J].公路与汽运,2023(1):137-139+152.  
[16] 招商局重庆交通科研设计院有限公司.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T 2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.  
[17] 曾玉华.考虑行波效应的大跨度双塔斜拉桥地震响应分析[J].公路与汽运,2022(3):94-97.

收稿日期:2023-05-31