

文章编号:1673-9469(2024)01-0045-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.007

## 外包钢壳混凝土异形索塔及其施工临时支撑研究

陈逸君<sup>1</sup>, 黄文金<sup>1\*</sup>, 王志福<sup>2</sup>, 刘君平<sup>3</sup>

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福建第一公路工程集团有限公司, 福建 泉州 362100;  
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 斜拉桥外包钢壳混凝土异形索塔结构受力复杂, 在施工阶段存在变形和应力过大等问题。为保障该类索塔的施工安全和线形标准, 设计了三种支撑方案以减小索塔的应力和变形, 并利用有限元法对不同支撑方案的技术性能进行分析。分析结果表明, 异形索塔的拱形轴线对塔柱应力和变形影响很大, 不同建模方法计算的索塔应力和变形差异较大; 三种方案的支撑均可显著减小索塔变形和腔内混凝土拉应力, 而四道双管方案对降低施工难度和误差最有效; 塔柱变形及混凝土拉应力对风压很敏感, 施工时应加强塔柱抗风措施设计。

**关键词:** 异形索塔; 钢壳混凝土结构; 施工控制; 有限元法; 方案比选

中图分类号: U443.38

文献标识码: A

## Research on External Steel Shell-Concrete Irregular Cable Tower and Its Temporary Construction Support

CHEN Yijun<sup>1</sup>, HUANG Wenjin<sup>1\*</sup>, WANG Zhifu<sup>2</sup>, LIU Junping<sup>3</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350108, China; 2. The First Fujian Highway Group Co. Ltd., Quanzhou, Fujian 362100, China;  
3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** The external steel shell concrete special-shaped cable tower structure of cable-stayed bridges is subjected to complex forces, and there are problems such as deformation and excessive stress during the construction stage. To ensure the construction safety and linear standards of this type of cable tower, three support schemes were designed to reduce the stress and deformation of the cable tower, and the technical performance of different support schemes was analyzed using the finite element method. The analysis results show that the arch axis of the irregular cable tower has a significant impact on the stress and deformation of the tower column, and the stress and deformation of the cable tower calculated by different modeling methods vary greatly. The support of all three schemes can significantly reduce the deformation of the cable tower and the tensile stress of the concrete inside the cavity, while the four channel double pipe scheme is the most effective in reducing construction difficulty and errors. The deformation of tower columns and the tensile stress of concrete are sensitive to wind pressure, and the design of wind resistance measures for tower columns should be strengthened during construction.

**Key words:** irregular shaped cable tower; steel shell-concrete structure; construction control; finite element method; scheme selection

市政桥梁作为城市重要的标志性建筑之一, 在结构选型时往往倾向于造型优美的斜拉桥。斜

拉桥索塔既是主要承重构件, 又是建筑美学的表现主体, 故许多斜拉桥索塔基于景观设计要求而

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078136); 福建省自然科学基金资助项目(2022J01156)

作者简介: 陈逸君(1999-), 女, 福建南平人, 硕士研究生, 从事组合结构桥梁方面的研究。

\* 通信作者: 黄文金(1975-), 男, 福建莆田人, 博士, 副教授, 从事组合结构桥梁方面的研究。

采用倾斜的异形结构。为了确保施工安全和质量,并控制异形索塔的现场施工进度及成本,宜采用少支架的临时支撑方案。因此,外观质量好、施工便捷的外包钢壳混凝土索塔应运而生<sup>[1]</sup>。然而,异形索塔在施工过程中的受力体系、荷载类型及大小都将发生剧烈变化,须严格控制索塔及其支撑体系的应力和变形状态。

对于钢筋混凝土异形索塔,学者们依托实际工程通过实验和有限元分析对其临时支撑体系的设计、优化和比选进行研究<sup>[2-5]</sup>。而钢壳混凝土索塔作为一种特殊的结构形式,学者们的研究主要是针对该类索塔的施工技术和受力情况。叶伟等<sup>[6]</sup>通过非线性有限元对外包钢板混凝土索塔的力学性能进行了分析。彭强<sup>[7]</sup>和陈平等<sup>[8]</sup>通过足尺模型试验研究了外包钢壳混凝土索塔的工艺流程和钢壳制造关键技术。樊健生等<sup>[9]</sup>对钢板-混凝土组合结构桥塔的受力机理、设计理论及工程应用的国内外发展状况进行了对比分析。但目前对于异形钢壳混凝土索塔的有限元建模方法及临时支撑方案的研究则相对较少。为确保此类型索塔的施工安全和质量,以于都大桥为工程背景,设计了三种临时支撑方案,并建立不同的有限元计算模型,分析支撑方案在施工过程中对外包钢壳混凝土索塔应力及变形的影响,以期对类似索塔及其支撑方案的设计与施工提供借鉴作用。

## 1 工程概况

于都大桥索塔横桥向采用“鱼跃”造型的异形拱,索塔包括下塔柱、下横梁、上塔柱三部分,见图1。支撑杆1—4为施工索塔时的临时水平钢管支撑。索塔下横梁采用箱形截面。在塔底处,两塔柱外缘横向间距为40 m,向上逐步外倾,在塔柱弧段理论分界处(Ⅲ-Ⅲ截面)达到最大值42 m,随后向上逐步呈拱形内收,塔柱轴线在Ⅲ-Ⅲ截面以下为圆弧,以上为椭圆。索塔截面顺桥向采用等宽度4.5 m;横桥向不等宽,在塔底为8.5 m,在Ⅲ-Ⅲ截面处为最小值4 m,在塔顶为7 m,其间匀顺变

化。索塔钢壳从下往上分为T0—T19共20个施工节段,采用先塔后梁的顺序施工,具体施工步骤见表1。表1中,CS<sub>*i*</sub>表示施工阶段 $i(i=1, \dots, 23)$ ,T0为塔底连接段,T2为下横梁节点处塔柱节段,T19为塔顶合龙段,L0为下横梁连接段。

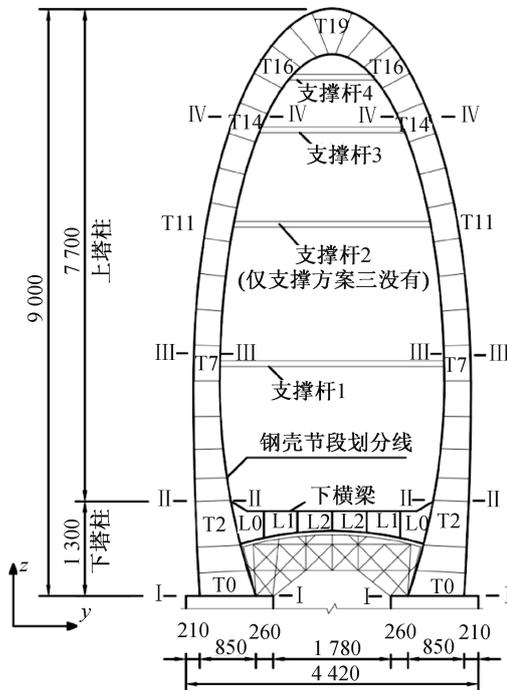


图1 索塔及其支撑布置方案(单位:cm)

Fig. 1 Layout of cable tower and supporting system (unit: cm)

索塔为实心截面,其中塔身外包钢壳由外包钢板、环向加劲肋、内角钢拉杆以及节点板构成,见图2。钢壳采用Q345 D级钢材,钢壳内浇筑C50混凝土。

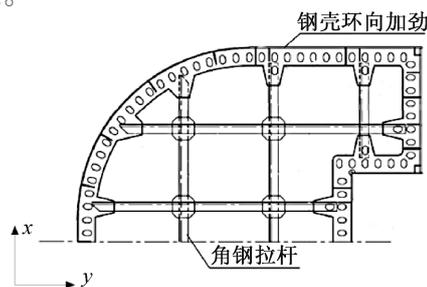


图2 索塔节段钢壳构造图

Fig. 2 Configuration of cable tower's steel shell segment

表1 索塔施工阶段编号及安装部件

Tab. 1 Numbering of construction stage and concerned installation parts of cable tower

编号	安装部件	编号	安装部件	编号	安装部件
CS1—3	塔柱 T0—2 节段	CS9—11	塔柱 T8—10 节段	CS17	塔柱 T16 节段及支撑杆 4
CS4	塔柱 T3 节段及 下横梁 L0 节段	CS12	塔柱 T11 节段及支撑杆 2	CS18—20	塔柱 T17—19 节段(合龙段)
	CS5—7	塔柱 T4—6 节段	CS13—14	塔柱 T12—13 节段	CS21
CS8	塔柱 T7 节段及支撑杆 1	CS15	塔柱 T14 节段及支撑杆 3	CS22	下横梁 L1 及临时顶升装置
		CS16	塔柱 T15 节段	CS23	下横梁 L2(下横梁合龙)

## 2 建模方法

对于索塔梁单元模型,采用 Midas Civil 软件建模。因塔柱钢材与混凝土尺寸在塔柱截面上相差很大,故钢壳混凝土塔柱采用双单元法模拟。在承台处对索塔单元进行固结,并根据上述施工步骤将施工阶段划分为 23 个。

对于壳-实体单元模型,采用 Midas FEA NX 软件建模,如图 3 所示,图中蓝色表示混凝土,玫红色表示钢壳,灰色表示钢壳拉杆及加劲肋。采用壳单元模拟索塔外包钢壳,采用实体单元模拟混凝土、下横梁及索塔支撑杆。不考虑腔内混凝土和钢壳的脱黏行为,以提高计算稳定性和分析效率。塔柱钢壳单元和腔内混凝土单元在界面处共用节点,并模拟有无钢壳内拉杆和加劲肋连接的两种状态。网格采用尺寸控制与自动生成技术相结合的方法进行划分。

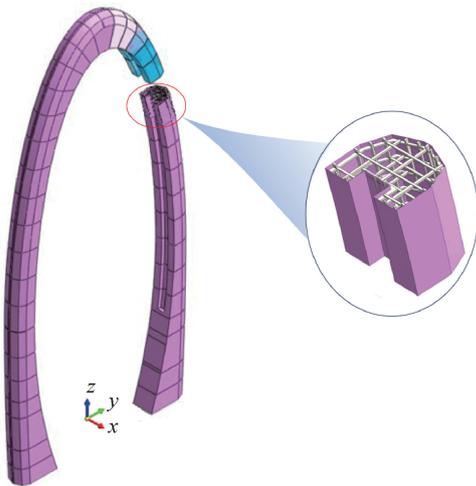


图 3 壳-实体单元模型

Fig. 3 Shell-solid element model

作用在索塔及其支撑体系的荷载有结构自重、风荷载和施工荷载。按《公路桥梁抗风设计规范》<sup>[10]</sup>计算的索塔基准高度处横桥向风荷载为 10.2 kN/m;施工荷载为 2.5 kN/m<sup>2</sup>。

## 3 支撑方案比选

### 3.1 支撑方案设计

塔柱在合龙前处于悬臂柱受力状态,若不设置索塔临时支撑,塔柱横桥向侧移将达塔高的 1/367,并使其根部和弧段理论分界处存在很大拉应力,不满足规范<sup>[11]</sup>对施工安全质量方面的要求。故综合考虑裸塔状态下的应力变形规律、节段划分及施工空间等因素后,共设计了三种支撑方案,见表 2。

单管或双管支撑方案的平面布置形式见图 4。对于双管支撑方案,两根钢管的纵桥向轴线中心距为 3 m。安装钢管支撑时,采用牛腿垫块和纵桥向安装限位块进行定位,以确保施工安全及支撑杆焊接精度。平联杆采用 H 型钢。钢管支撑杆合龙处采用对接剖口焊并采用纵向加劲肋进行补强。

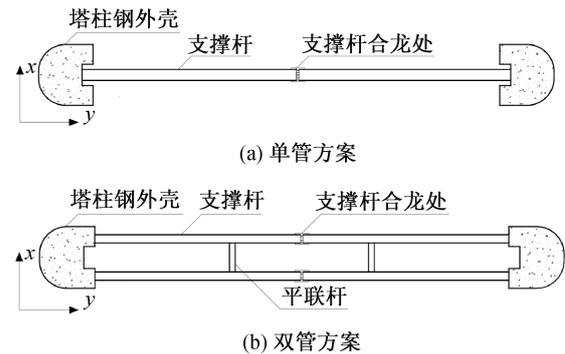


图 4 塔柱支撑杆平面布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the layout of tower pillar support rods

表 2 临时支撑方案设置及计算结果

Tab. 2 Arrangement of temporary supporting system and the calculation results

方案编号	方案名称	结构示意图	支撑杆数量及截面尺寸/mm	计算结果		技术性能
				混凝土拉应力/MPa	塔柱横桥向侧移/mm	
一	四道单管方案		支撑杆 1、2、3、4 均采用 $\phi 1200 \times 12.0$	1.74	13.4	在检修凹槽内安装,施工难度最大;对索塔扭转约束能力最小;不便搭设施工平台
二	四道双管方案		支撑杆 1、2、3、4 均采用 $2\phi 820 \times 10.0$	1.64	11.1	施工难度最小;对索塔扭转约束能力最大
三	三道双管方案		支撑杆 1、3、4 均采用 $2\phi 920 \times 10.0$	1.80	12.1	施工难度较小;对索塔扭转约束能力较大

### 3.2 不同支撑方案的索塔应力及变形

#### 3.2.1 变形

施工时塔柱变形差过大会导致下一节段钢壳焊接困难,影响施工质量,故在施工过程中,应对塔柱坐标及高程进行实时监控。

三种方案的变形模式类似,见图5,塔柱变形均控制在 $15\text{ mm}(H/6\ 000)$ 以内,均能满足施工要求。在合龙前塔柱最大变形位于其悬臂端。塔柱变形随着节段浇筑高度的增加而增大,从施工阶段CS12开始,由于塔柱的拱形轴线越来越弯曲,故塔柱因弯曲变形引起的横向侧移和竖向挠度随之显著增大。在合龙后,即从施工阶段CS21开始,塔柱已形成拱形结构,即便拆除支撑杆,塔柱的横向弯曲刚度也大于合龙之前的,因此由风压等非对称荷载引起的塔柱横桥向侧移开始减小。由此可见,施工时应密切监测塔柱变形尤其是横桥向侧移,保证塔柱线形与设计线形一致,同时在合龙前还需严格控制合龙温度和横桥向非对称荷载,以确保索塔顺利合龙。

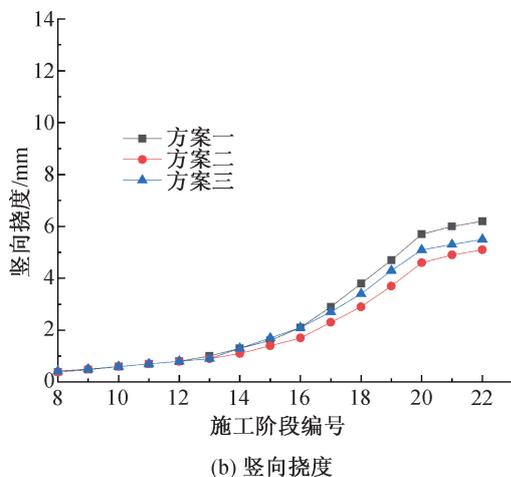
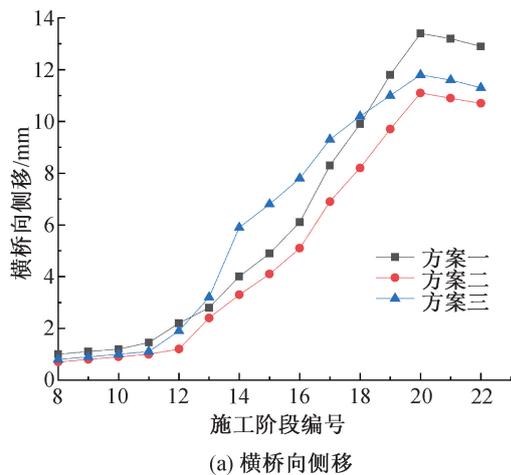


图5 塔柱顶端变形

Fig. 5 Deformation of the top of tower column

此外,对于方案三,从施工阶段CS12开始,由于不设支撑杆2,悬臂弯曲塔柱的变形尤其是横桥向侧移将迅猛增大,既增大塔柱的钢壳安装误差和线形控制难度,又降低焊缝质量,甚至引发施工安全事故。因此,在施工中,应注意横桥向侧移的监控。特别值得一提的是,合龙后索塔的最大变形位置将由合龙前的悬臂端变化到IV-IV截面附近,因此应密切监测支撑杆3的轴力和接头安装质量。

#### 3.2.2 应力

上述塔柱变形分析表明,在安装塔柱钢壳和浇筑腔内混凝土时塔柱将发生较大的弯曲变形。裸塔状态下(无支撑)塔柱在IV-IV截面将发生很大的横桥向侧移,塔柱根部和弧段理论分界处即I-I和III-III截面的混凝土将承受很大的竖向拉应力,导致混凝土开裂。设置支撑后,支撑将限制塔柱的横桥向侧移,使得混凝土拉应力显著减小,尤其是III-III截面,各支撑方案的混凝土拉应力均控制在 $1\text{ MPa}$ 以内。对于I-I截面,支撑对混凝土拉应力的减小作用小于III-III截面,混凝土拉应力在索塔的整个施工过程中都在增大,见图6。

如图6所示,三种支撑方案的塔柱混凝土拉应力变化规律大体相似,施工到CS20(索塔合龙)后拉应力不再大幅变化。在CS16时,塔柱腔内混凝土拉应力超过 $1\text{ MPa}$ ,此后逐渐逼近C50混凝土抗拉强度设计值即 $1.89\text{ MPa}$ ,因此从CS16到CS20应重点监控I-I截面的混凝土拉应力,防止混凝土开裂。

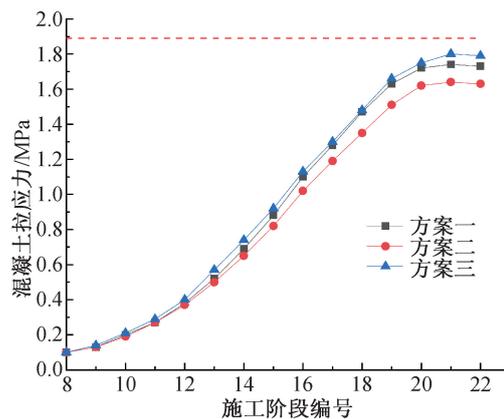


图6 塔柱混凝土拉应力

Fig. 6 Tensile stress of concrete in tower's column

支撑杆也可以显著减小塔柱的压应力,尤其是对于压应力最大的“悬臂柱”底端I-I截面。以塔柱应力最大的支撑方案一为例,该截面混凝土以及钢壳的最大压应力分别为 $8.2\text{ MPa}$ 和

119.1 MPa,与未设置支撑的裸塔状态相比分别减少了 70%和 63%。

### 3.2.3 风荷载作用分析

在索塔结构合龙前,横桥向风荷载将进一步加大索塔横桥向侧移和腔内混凝土竖向拉应力。不同风速下塔柱的横桥向侧移见图 7,图中的横坐标为按照规范<sup>[10]</sup>依据设计基准风速  $U_d$  计算得到的索塔基准高度处的等效阵风风速  $U_g$ 。

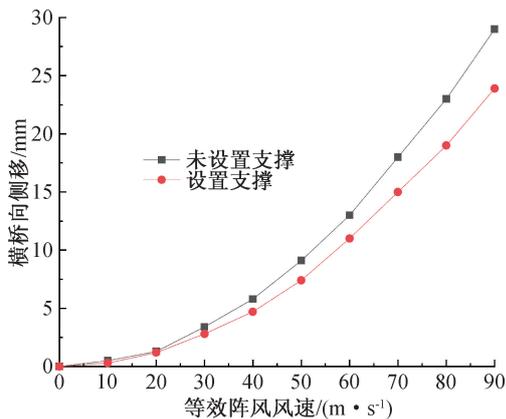


图 7 不同风压下的塔柱变形

Fig. 7 Deformation of tower column under wind

由图 7 可知,塔柱横桥向侧移随风速增大呈二次抛物线显著增大,而支撑可显著约束风压下的塔柱变形。当等效阵风速度达到 40 m/s 时,设支撑前后索塔横桥向侧移分别为 5.8、4.7 mm,支撑将减小 23%的塔柱横桥向侧移。

由于索塔横桥向侧移将在腔内混凝土中引起竖向拉应力,当风速较大时可能导致混凝土开裂。不同风速引起的腔内混凝土竖向拉应力见图 8。如图 8 所示,对于最低基本风速 24.5 m/s 即等效阵风风速 34 m/s,腔内混凝土竖向拉应力达到 0.5 MPa。因此,在设计和建模验算时应充分考虑

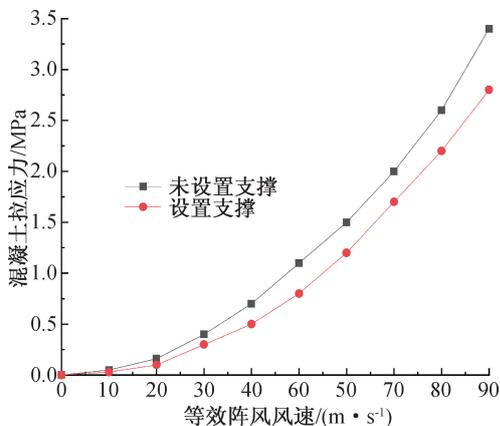


图 8 不同风压下的塔柱混凝土拉应力

Fig. 8 Tensile stresses of concrete under wind

风荷载对索塔结构的影响,在施工时应采取抗风措施以减少风荷载引起的索塔变形和混凝土拉应力。

### 3.3 支撑杆的应力、变形及稳定性

支撑杆在施工中将承受较大的应力和变形,为防止支撑杆发生破坏,保证索塔施工安全,除了分析验算塔柱外,还需对支撑杆的应力、变形及稳定性进行验算。

#### 3.3.1 变形

支撑方案二的支撑杆轴向变形最小,其最大压缩变形出现在支撑杆 4 为 7.1 mm,最大拉伸变形出现在支撑杆 1 为 9.3 mm。对于支撑杆 4 即塔柱最后一道支撑杆,施工过程中需对其长度加工精度和节点连接质量进行严格控制,以保证索塔顺利合龙。

对于支撑杆最大竖向挠度,均出现在索塔合龙阶段。其中,靠近塔底的支撑杆 1 变形最大,支撑方案一、二、三的计算值分别为 37.6、29.1、31.2 mm,均小于 47.4 mm ( $l/400$ ,  $l$  为支撑长度),其竖向挠度符合规范要求。

#### 3.3.2 应力及稳定性验算

未合龙前塔柱为弯曲悬臂柱,其受力状态见图 9。如图 9(a) 所示,因该阶段塔柱的重心位于塔柱根部截面重心外侧,支撑杆 1 需提供拉力  $F$  以平衡重力  $G_1$  引起的逆时针弯矩  $M$ ,随着塔柱节段的内倾,负偏心距  $e$  逐渐减小,导致支撑杆 1 所受拉力逐渐减小;但是,后续安装的支撑杆 2—4 协助支撑杆 1 抑制塔柱内倾,使得支撑杆 1 拉力变化有限,在整个施工过程中始终承受拉力。对于四道支撑方案的支撑杆 2,如图 9(b) 所示,因塔柱悬臂段(支撑杆 2 之上部分)的重心位于支撑杆 1 与塔柱连接点的右侧,支撑杆 2 需提供推力以平衡顺时针弯矩  $M$ ,随着塔柱节段增长,正偏心距  $e$  逐渐增大,导致支撑杆 2 所受压力逐渐增大;至安装支撑杆 3 后,支撑杆 2 压力减小;当索塔合龙形成拱结构时,因支撑杆 2 接近“拱脚”(塔柱弧段分界线),在拱的水平推力作用下,支撑杆 2 由受压转为受拉。同理,支撑杆 3、4 刚开始都是承受压力的,但在塔柱合龙后由于远离“拱脚”,故在整个施工过程中始终受压。同样地,对于三道支撑方案,其支撑杆 1 始终受拉,支撑杆 3 由安装时的受压逐渐转为受拉,支撑杆 4 则始终受压。因此,在施工过程中应注意监控中间支撑杆的轴力变化,并严格监控各支撑杆的接头焊接质量。

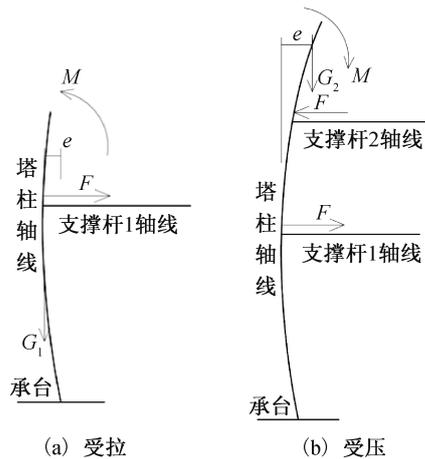


图9 支撑杆受力状态示意图

Fig. 9 Illustration of supporting strut's axial force

各方案支撑杆考虑稳定系数后的应力见表3,表中应力拉为正压为负。由表3可知,各支撑杆应力均小于Q235级钢材的屈服强度,满足强度及稳定性要求。

表3 支撑杆轴向应力对比 (单位:MPa)

Tab. 3 Comparison of supporting strut's

方案	支撑杆 1	支撑杆 2	支撑杆 3	支撑杆 4
一	113.6	-78.4~73.1	-98.2	-80.2
二	95.5	-75.2~64.6	-94.2	-77.8
三	108.6	—	-128.1~58.8	-79.6

### 3.4 临时支撑方案比选

上述计算分析表明,各支撑方案的塔柱及其支撑体系的强度和刚度均符合规范要求,而采用四道双管的方案二的应力和变形最小(表2),且有利于在支撑杆上搭设施工平台,故推荐采用方案二。

## 4 建模方法对比

本桥索塔为组合结构,且轴线为拱形,不同的

建模方法对计算结果有一定影响。梁单元模型建模简单、计算快,一般用于施工验算的简单分析。但梁单元无法体现出结构相对薄弱、容易形成应力集中的局部细节。因此,本文分别采用梁单元和壳-实体单元建立设置四道双管支撑的索塔模型以对比不同建模方法。

以支撑方案二的索塔及其施工临时支撑为例,不同模型的计算结果见表4。如表4所示,对于没模拟施工阶段的模型BM1,由于忽略了塔柱合龙前的应力累加过程,因此其计算的变形比有模拟施工阶段的模型BM2的小46%~59%,应力小51%~60%。这说明对于异形钢壳混凝土索塔,分析时应模拟施工阶段,否则计算结果将有很大误差。

对于没模拟钢壳内拉杆和加劲肋的壳-实体单元模型SM1,其计算的横桥向侧移、竖向挠度分别比梁单元模型BM2的大73%和51%,而钢和混凝土的应力差值仅为8%~18%。造成这种现象的原因是,BM2的钢壳在同一截面上的变形相同,而SM1没模拟钢壳内拉杆和加劲肋,导致外包钢壳变形计算结果偏大。对于有模拟钢壳内拉杆和加劲肋的壳-实体模型SM2,其计算的变形比梁单元模型BM2的大14%~16%,应力大6%~12%,差别不大。由此可见,当进行施工简单验算或无需进行局部精细分析时,可以采用考虑施工阶段的梁单元模型BM2,而当需要准确模拟局部精细分析时,如浇筑腔内混凝土阶段时的钢壳节段、检修凹槽和角点等处的应力和横断面变形,应采用模拟钢壳内拉杆和加劲肋的壳-实体单元模型。

此外,SM1计算的应力仅比SM2大2%~5%,而变形大31%~52%,说明钢拉杆和加劲肋对改善钢壳应力的作用不明显,但可以有效减小钢壳变形。因此,在实际施工中,为减小外包钢壳变形影响施工精度,应严格控制节段划分长度并及时安装钢壳内拉杆及加劲肋。

表4 不同有限元模型计算结果对比

Tab. 4 Comparison of different finite element models' calculation results

模型编号	模型名称	最大横桥向侧移/mm	最大竖向挠度/mm	混凝土竖向应力/MPa		钢壳 Mises 应力/MPa	
				$\sigma_t^c$	$\sigma_c^c$	$\sigma_t^s$	$\sigma_c^s$
BM1	梁单元模型(无施工阶段)	5.9	2.1	0.8	2.1	40.7	36.2
BM2	梁单元模型	11.0	5.1	1.64	5.2	98.6	81.4
SM1	壳-实体单元模型	19.0	7.7	1.81	5.9	106.5	96.1
SM2	壳-实体单元+钢拉杆+加劲肋	12.5	5.9	1.78	5.6	104.5	91.1
	(BM1-BM2)/BM2	-46%	-59%	-51%	-60%	-59%	-56%
	(SM1-BM2)/BM2	73%	51%	10%	13%	8%	18%
	(SM2-BM2)/BM2	14%	16%	9%	8%	6%	12%
	(SM1-SM2)/SM2	52%	31%	2%	5%	2%	5%

## 5 结论

1) 索塔的拱形轴线对其内力和变形影响很大,在合龙前后索塔内力和几何状态将发生较大改变,且对横桥向荷载作用很敏感。

2) 索塔支撑可显著降低塔柱变形和混凝土应力;本文提出的三种支撑方案即四道单管方案、四道双管方案以及三道双管方案,均能满足施工阶段索塔及其支撑体系的强度、刚度和稳定要求,提高索塔安装精度,其中四道双管支撑方案的综合性能最优。

3) 采用有限元模拟时,应考虑非对称荷载和施工阶段划分对钢壳混凝土异形索塔整体受力变形的影响;梁单元模型能准确计算塔柱的竖向应力和整体变形;而横断面应力和局部变形分析,应采用模拟构造细节的壳-实体模型。

4) 拉杆及加劲肋对减小塔柱外包钢壳变形的作用很大;吊装钢壳时应先焊接拉杆和加劲肋,并严格控制塔柱节段长度。

5) 风荷载对塔柱横桥向侧移及腔内混凝土拉应力影响很大,应重视索塔抗风变形验算,并加强抗风措施。

### 参考文献:

[1] 刘明虎. 桥梁钢-混凝土结合技术工程实践与展望

[J]. 桥梁建设,2022,52(01):18-25.

[2] 卫君,曾志豪,李定有. 斜拉桥异型拱塔施工临时横撑方案比选[J]. 桥梁建设,2017,47(04):113-118.

[3] 吕长荣,王岩. 内倾式斜拉桥桥塔临时横撑施工方案优化应用研究[J]. 公路,2018,63(09):105-111.

[4] 王杰,徐启利. 平潭海峡公铁两用大桥元洪航道桥桥塔桁架式临时横撑设计[J]. 世界桥梁,2018,46(04):22-26.

[5] 赵全成,刘晓波,左小明. 武汉青山长江公路大桥北塔临时横撑设计[J]. 桥梁建设,2020,50(S1):100-105.

[6] 叶伟,沈锐利,唐茂林. 外包钢板混凝土悬索桥桥塔极限承载力研究[J]. 北京交通大学学报,2006,30(S1):211-217.

[7] 彭强. 南京长江五桥钢壳混凝土桥塔足尺模型工艺试验[J]. 桥梁建设,2019,49(03):46-50.

[8] 陈平,华乐. 南京长江第五大桥钢混组合塔钢壳制造关键技术[J]. 世界桥梁,2019,47(03):20-25.

[9] 樊健生,朱尧于,崔冰,等. 钢板-混凝土组合结构桥塔研究及应用综述[J]. 土木工程学报,2023,56(04):61-71.

[10] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.

(责任编辑 王利君)

(上接第32页)

[7] DI C, RESSI A. Construction of the deep cut-off at the Walter F. George Dam[C]// Proceedings of Sessions of the Geo-Support Conference: Innovation and Cooperation in Geo, 2004: 530-544.

[8] ANDERSON T C. Secant piles support access shafts for tunnel crossing in difficult geologic conditions[M]//Geo-Support 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods, and Specialty Foundation Systems, 2004: 299-308.

[9] TONY S. Conflicting requirement for firm pile concrete in secant pile walls[J]. Concrete, 2005, 39(6): 26-27.

[10] 王安龙. 钻孔咬合桩——地铁工程围护结构新型式[J]. 铁道工程学报,2003(1):7.

[11] 张中安. 钻孔咬合桩在深圳地铁会—购区间施工中的应用[J]. 西部探矿工程,2003,15(2):133-134.

[12] 范恒秀,李昌宁. 杭州地铁深基坑钻孔咬合桩施工设

备组合与应用[J]. 西部探矿工程,2005,17(7):2.

[13] 李鹏. 钻孔咬合桩在地铁车站围护结构中的施工技术[J]. 西部探矿工程,2005,17(5):3.

[14] 康涛,刘佑荣. 钻孔咬合桩新工艺应用中遇到的问题分析[J]. 土工基础,2005,19(4):3.

[15] 杨建学,侯伟生,郑陈旻,等. 冲孔咬合桩在某邻海深基坑围护中的工程应用[J]. 岩土工程学报,2010(S1):207-209.

[16] 秦东平,边可,王伟东,等. 咬合桩止水帷幕在PBA暗挖隧道中的应用研究[J]. 都市轨道交通,2022,35(4):135-139.

[17] 张晓涛,贾方毅. 砂卵石地层地铁车站基坑咬合桩围护结构参数分析[J]. 四川建筑,2023,43(1):77-80.

[18] 李恒,谢洪阳,叶云雪,等. 桩长对咬合桩抗弯性能影响的试验研究[J]. 江西建材,2023(1):32-34.

(责任编辑 王利君)