DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.016 文章编号:1671-2579(2025)02-0141-09

无横梁人字形索塔临时横撑的合理设置方案

吴玉贤[1],李传习[2]
(1.保利长大工程有限公司,广东 广州 510620;2.广西大学,广西 南宁 530000)

摘要:在建的香山大桥为主跨880 m的双塔双索面双层钢桁梁半漂浮体系斜拉桥。其索塔呈人字形,梁底仅设牛腿、无横梁,塔肢轴线与铅直线呈9.9°、悬臂长度165.8 m,倾斜塔肢的悬臂长度较为罕见。合理的临时横撑设置除应确保索塔施工安全外,还应方便桥塔、临时横撑等的施工,节省临时横撑的投入。针对临时横撑确定的传统受力安全原则"倾斜塔肢水平位移不超过轴线容许偏差,塔肢应力不超标"导致设置过多主动横撑的不足(增加了不必要措施与费用),采用新的简化受力安全原则"塔肢应力不超标"。通过有限元软件Midas Civil对索塔施工各阶段的仿真计算,结合香山大桥索塔结构特点和桥址水文、气象条件,研究确定了香山大桥索塔临时横撑位置、截面尺寸、主动力大小和拆除顺序等横撑设置方案。研究结果表明:所得设置方案临时横撑数量少,仅设一层主动横撑;采用所得横撑设置方案,索塔施工顺利(即将封顶),未产生任何裂缝,索塔轴线偏差在设计容许范围内。

关键词:人字形索塔;临时横撑设置;受力安全原则;仿真计算
中图分类号:U445.4 **文献标志码:**A

Reasonable Design Scheme of Temporary Lateral Bracings for a Herringbone-Shaped Pylon without Crossbeams

WU Yuxian[1], LI Chuanxi[2]
(1. Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510620, China; 2. Guangxi University, Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: The Xiangshan Bridge under construction is a semi-floating cable-stayed bridge with double pylons, double cable planes, and double-deck steel truss girders. The pylons are herringbone-shaped, with only corbels at the beam bottom and no crossbeams. The axis of the pylon limb is 9.9° to the plumb line, and the cantilever length is 165.8 m. The cantilever length of the inclined pylon limb is rare. In addition to ensuring the safety of pylon construction, reasonable design schemes of temporary lateral bracings should also facilitate the construction of pylons and temporary lateral bracings and save the investment of temporary lateral bracings. In view of the shortcomings of setting too many active lateral bracings (increasing unnecessary measures and costs) caused by the traditional force safety principle, such as "the horizontal displacement of the inclined pylon limb does not exceed the allowable deviation of the axis, and the stress of the pylon limb does not exceed the standard", a new simplified force safety principle that "the stress of the pylon limb does not exceed the standard" was adopted. Through the simulation calculation of each pylon construction stage by the finite element software Midas Civil, combined with the structural characteristics of the Xiangshan Bridge pylon and the hydrological and meteorological conditions of the bridge site, the design scheme of the temporary lateral bracings position, section size, active force size, and demolition sequence for the Xiangshan Bridge pylon was determined. The number of temporary lateral bracings in the obtained design scheme was small, and only one layer of active bracings was set. By using the obtained design scheme for lateral bracings, the construction of the pylon is smooth (it is about to cap), and no cracks are generated. The axis deviation of the pylon is within the allowable range of the design.

Keywords: herringbone-shaped pylon; temporary lateral bracing setting; force safety principle; simulation calculation

收稿日期:2023-10-04(修改稿)
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:50778024)
作者简介:吴玉贤,男,工程师.E-mail:1445538310@qq.com

0 引言

倾斜塔肢施工的临时横撑设置方案深受相关大桥建造工程师们的关注[1-6]。临时横撑的设置不仅应确保倾斜塔肢在自重和爬模等施工荷载作用下的安全,还应兼顾施工方便和投入节省[1-3]。前者,本文称为临时横撑设计的受力安全原则,具有必要性;后者,称为方便与经济原则,具有重要性。随着倾斜塔肢悬臂长度(从塔根到第一道永久横梁的长度,下同)的增加,临时横撑方案的合理性对索塔建造总费用的影响日益显著,方便与经济原则的重要性日益突出。

传统的索塔一般会在梁底设置一道横梁,横梁除了用于安装支座、阻尼器等,还可以起到横向支撑作用,抵抗自重、施工荷载等产生的不利弯矩[4-5],有效降低塔柱最不利位置的拉应力。因景观需要,香山大桥索塔在梁底位置无横梁,虽主跨880 m的香山大桥斜拉桥索塔塔肢悬臂长度较为罕见,仅略低于武汉青山长江公路大桥[6],但塔肢的倾斜角度(塔肢轴线与铅直线夹角,下同,略)远大于武汉青山长江公路大桥[6],对施工过程中塔根外侧或其他控制部位拉应力的控制带来了更大的挑战。

临时横撑设计的传统受力安全原则"以桥塔线形控制为主,内力控制为辅"或"以桥塔内力控制为主,线形控制为辅",实质上均是"倾斜塔肢水平位移不超过轴线容许偏差,塔肢应力不超标"[5-9]。事实上,在确保"塔肢应力不超标"前提下,桥塔线形(或桥塔轴线偏差)控制可通过预偏量(相当于主梁的预拱度)设置来实现。在受力安全原则中过分强调"倾斜塔肢水平位移近似为0",导致过多横撑和主动横撑的设置,增加了不必要的主动措施与费用。为此,笔者将临时横撑的确定受力安全原则简化为"塔肢应力不超标",并针对塔肢倾斜角度9.9°、悬臂长度165.8 m的香山大桥人字形索塔施工临时横撑设置方案进行研究,发现横撑数量(6层)和主动横撑数(1层)远小于塔肢倾斜角度5.3°、悬臂长度168.3 m的武汉青山长江公路大桥A索塔按传统受力安全原则所得的相应数量(上横梁之下的8层和8层)[6]。

1 工程概况

中山东环高速公路一期工程起于广东省中山市黄圃镇大雁岛,终点与中开高速设置的横门西枢纽互通处相交,路线全长34.2 km,其中香山大桥跨越横门水道。桥址区位于华南沿海海域,地势开阔,属南亚热带季风气候,夏秋两季常有强热带风暴侵袭本区,平均每年1~4次,风力常达7~9级,最大12级,风速最大可达34 m/s。香山大桥为跨度(136+312+880+312+136) m=1 776 m的双塔双索面上下双层各八车道钢桁梁斜拉桥,半漂浮体系。桥型布置图见图1。

香山大桥索塔采用双索面人字形塔,由下塔柱(牛腿段)、中塔柱和上塔柱组成。索塔构造图见图2。上塔柱采用对称D字形断面。索塔由顶部截面尺寸为21.0 m(横桥向)×14.0 m(顺桥向)独柱塔(横断面见图3)渐变至下塔柱截面尺寸为14 m(横桥向)×17 m(顺桥向)D字形断面双塔柱(横断面见图4)。因景观需要两塔肢全高范围内无横梁,主梁下的支座安装在牛腿上。南岸索塔总高度为261.2 m,其中上塔柱高105.5 m,中塔柱高113.1 m,下塔柱高度38.1 m。索塔两倾斜塔肢在合龙段施工前的最大悬臂长度达165.8 m,水平投影长度达32.5 m。索塔中下塔柱横向外侧倾角11.5°(塔肢轴线倾角约9.9°),内侧牛腿倾角20.6°。索塔混凝土标号C55,南岸索塔方量3.8万m³(北岸索塔承台顶标高略有不同,承台顶以上的索塔尺寸基本相同,下文仅以南岸索塔为例阐述)。

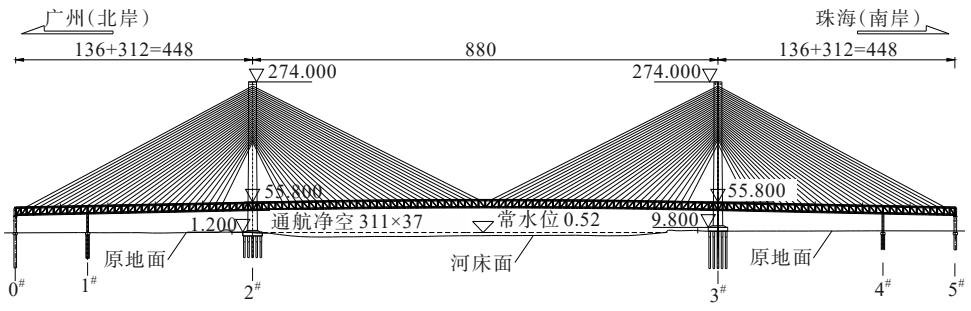

图1 香山大桥桥型布置图(单位:m)

Figure 1 Configuration of Xiangshan Bridge (unit: m)

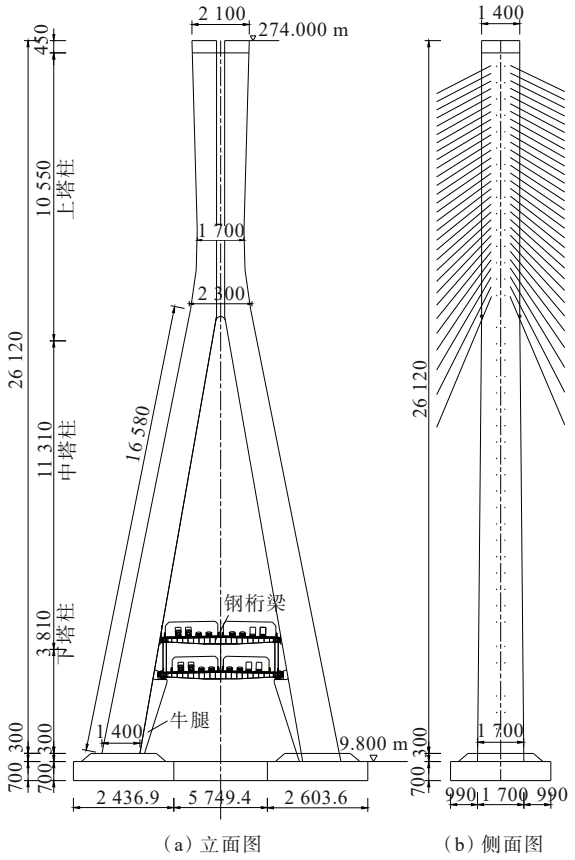

图2　香山大桥南岸索塔构造（单位：cm）

Figure 2　Structure of south pylon of Xiangshan Bridge (unit: cm)

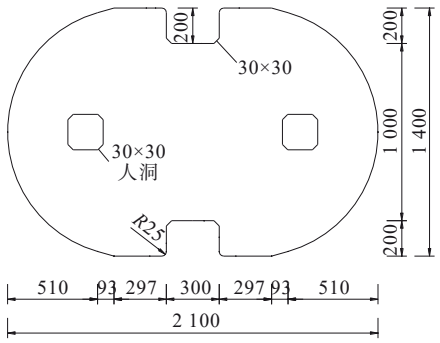

图3　索塔顶部横断面图（单位：cm）

Figure 3　Cross section of top of pylon (unit: cm)

南岸索塔采用液压爬模施工[10-15]，共分为45个节段（标准节段高6 m），其中的中、下塔柱分段示意见图5。

2　临时横撑的设计

2.1　临时横撑的设计原则

索塔临时横撑设计应遵循的原则可概括为两个方面[5-6,16-17]：

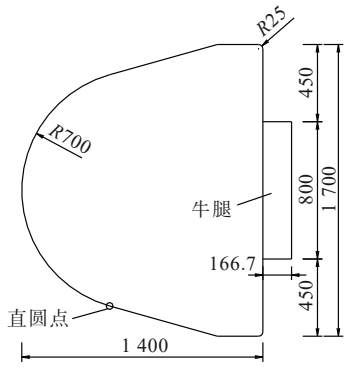

图4　索塔底部横断面图（单位：cm）

Figure 4　Cross section of bottom of pylon (unit: cm)

（1）受力安全原则。即施工阶段及临时横撑拆除后塔址应力不超过规定值，通常由塔根和临时横撑上缘塔肢的外侧混凝土的拉应力控制。对于本桥索塔C55混凝土，其拉应力不应超过其抗拉强度设计值1.96 MPa[16]。

（2）施工方便和投入节省原则。具体可分解为以下3个方面：① 临时横撑设置位置、层数、间距、结构形式应结合塔形、液压爬模高度、施工工艺等综合考虑；② 主动横撑和被动横撑相结合，但主动横撑的安装工序烦琐，施加主动力的操作步骤较为复杂，安全风险大，非必要不设置主动横撑；③ 临时横撑设置高度在每一个施工阶段均应避开液压爬模系统。

2.2　各层临时横撑的设计

2.2.1　第1层临时横撑

临时横撑采用钢管支撑结构体系，钢管规格大、质量重，安装难度大，施工工效慢。设置第1层临时横撑时，如果设置高度太低，会影响施工进度，且不能充分发挥临时横撑的承载能力；如果设置过高，则塔根外侧或其他控制部位拉应力有超限的风险。因此需合理选择第1层临时横撑的设置高度。采用Midas Civil软件建立索塔有限元计算模型，分析在不设置临时横撑的情况下塔根外侧的应力变化情况。计算结果见表1，其中的节段顶高程见图5。

由表1可知：不设置临时横撑时，塔根外侧拉应力随着浇筑高度的增加而不断增大。在浇筑完成第8节塔柱混凝土后外侧根部最大拉应力增大至0.99 MPa，已达到规范的限值。安装临时被动横撑后不能立即改善索塔的受力性能，随着后续索塔节段的施工才逐步起到支撑作用。鉴于此，拟在索塔第7节混凝土浇筑之前设置第1层临时横撑。第1层临时横撑安装时机为索塔第6节施工完成，液压爬模系统

表1 不设置临时横撑时索塔应力计算结果

Table 1 Calculated stress of pylon without temporary lateral bracings

索塔节段	节段高度/m	节段顶高程/m	塔根外侧应力/MPa	备注
1	5.50	18.30	−0.09	压应力
2	5.50	23.80	−0.05	压应力
3	5.50	29.30	0.06	拉应力
4	5.40	34.70	0.22	拉应力
5	5.35	40.05	0.49	拉应力
6	5.85	45.90	0.66	拉应力
7	5.90	51.80	0.81	拉应力
8	5.90	57.70	0.99	拉应力

爬升至第7节,且在第7节混凝土浇筑之前。

为避免与液压爬模系统冲突,临时横撑应设置在液压爬模系统的吊平台以下适当位置。为了确保施工安全,横撑上应设置1.5 m高的护栏。液压爬模系统总高度16.0 m,其中上平台高度6.2 m,中平台和吊平台总高度9.8 m。则第1层临时横撑设置的高程应在45.9−9.8−1.5−2.5/2(横撑高度的一半)=+33.35 m以下。根据表1,第1层临时横撑设置在索塔第4节(+29.30~+34.70 m)适当位置。为方便横撑下方的绕塔平台安装,第1层临时横撑中心线标高定为+30.80 m。经过计算,第1层横撑采用3根ϕ2 500 mm×30 mm钢管作为主要支撑结构。

2.2.2 第2~3层临时横撑

影响第2、3层临时横撑设置的主要因素有:① 与第1层横撑间距适当;② 香山大桥边跨及浅滩区主梁采用顶推工艺施工,索塔施工过程中同步顶推边跨主梁就位。第2层和第3层临时横撑应避开主梁范围,且应在主梁顶面预留足够的施工车辆通行空间,在主梁底部预留护栏高度。因此第2、3层临时横撑之间的间距应≥15.6 m(主梁梁高)+8.0 m(施工预留高度)+2.5 m(横撑占用高度)+1.5 m(护栏高度)=27.6 m;③ 因索塔无横梁,应使下塔柱牛腿段临时横撑具备足够的刚度,确保施工期间塔根外侧拉应力不超限;④ 第2、3层临时横撑分别在主梁底面和顶面,此高度位置适中,操作较方便;⑤ 主动横撑既可减小施工期塔柱拉应力,又可改善塔柱成桥状态的应力[18-19]。但主动力过大会对桥塔产生不利影响,主动力过小会导致不能充分发挥横撑对桥塔的约束作用。因此,是否采用主动横撑及主动力大小应通过计算确定。

当第2层临时横撑施加不同主动力时,塔根外侧的应力见表2。

表2 施加不同主动力时塔根应力计算结果

Table 2 Calculated stress at bottom of pylon with different active forces imposed

施工阶段	不同主动力(t)时的塔根应力/MPa				
	0	150	250	350	450
阶段01(1~6节)	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
阶段02(7~8节)	0.76	0.51	0.34	0.16	−0.02
阶段03(9~13节)	1.22	0.97	0.83	0.69	0.54
阶段04(14~17节)	1.63	1.39	1.26	1.13	0.98
阶段05(18~21节)	1.55	1.31	1.18	1.05	0.90
⋮					

经过计算分析,第2层横撑采用3根ϕ2 500 mm×30 mm钢管作为主要支撑结构,设置标高+36.80 m,安装后对单根钢管施加主动力450 t;第3层横撑采用4根ϕ1 200 mm×12 mm钢管作为主要支撑结构,设置标高+64.82 m,被动横撑。两层临时横撑之间中心间距28.0 m。

2.2.3 第4~6层临时横撑

随着索塔施工高度的不断增高,左右幅两个塔肢的间距越来越近,索塔单节混凝土方量越来越小,临时横撑的钢管尺寸可根据计算分析结果适当减小,横撑之间的竖向间距可以适当增加。经计算分析,第4~6层横撑均采用3根ϕ1 200 mm×12 mm钢管,横撑之间间距23~28 m(约4个索塔节段),均可采用被动横撑。

2.2.4 所有临时横撑汇总

南岸索塔施工需设置的上述6层临时横撑结构尺寸及布置汇总于表3。

表3 临时横撑的结构尺寸及标高

Table 3 Size and elevation of temporary lateral bracings

临时横撑	标高/m	数量-结构尺寸	性质
第1层	+30.80	3-ϕ2 500 mm×30 mm	被动横撑
第2层	+36.80	3-ϕ2 500 mm×30 mm	主动,3×450 t
第3层	+64.82	4-ϕ1 200 mm×12 mm	被动横撑
第4层	+87.82	3-ϕ1 200 mm×12 mm	被动横撑
第5层	+111.85	3-ϕ1 200 mm×12 mm	被动横撑
第6层	+140.25	3-ϕ1 200 mm×12 mm	被动横撑

第1层临时横撑支撑钢管长度45.1 m,第2层临时横撑支撑钢管的长度41.3 m。为防止第1、2层临时横撑安装后下挠过大,在第1、2层临时横撑下设置

钢管立柱＋型钢结构形式的支撑架。第3层临时横撑位于主梁的正上方，可兼做主梁施工时的临时防护平台。临时横撑的总体布置图见图5。

3　临时横撑拆除时机分析

3.1　方案1：合龙段施工完成后拆除临时横撑

具有下横梁的人字形索塔施工，其临时横撑一般在索塔合龙后即可拆除。按此模拟计算得到：香山大桥在合龙段施工完成后，其最不利位置的拉应力为0.50 MPa，临时横撑拆除后塔根外侧的拉应力变为3.02 MPa，拉应力增加了2.52 MPa。方案1各个施工阶段塔根外侧最大拉应力见表4。

3.2　方案2：索塔封顶后拆除临时横撑

按“索塔封顶后拆除临时横撑”的方案模拟计算得到：香山大桥在索塔封顶后其塔根外侧的拉应力为0.02 MPa，然后拆除临时横撑，塔根外侧的拉应力变为2.26 MPa，拉应力增加了2.24 MPa。方案2各施工阶段塔根外侧最大拉应力见表5。

3.3　方案3：索塔封顶后拆除部分横撑，全桥合龙后拆除剩余横撑

因第1层和第2层临时横撑位于钢桁梁以下，受钢桁梁限制拆除作业困难，条件允许时应尽早拆除。按“索塔封顶后拆除第1和第2层横撑，全桥合龙后拆除剩余横撑”的方案模拟计算得到：香山大桥在索塔封顶后其塔根外侧的拉应力为0.02 MPa。拆除第1和第2层横撑，塔根外侧的拉应力变为0.42 MPa，拉应力增加了0.40 MPa。全桥合龙并拆除剩余横撑后其塔根外侧的拉应力为0.02 MPa。方案3各施工阶段塔根外侧最大拉应力见表6。方案1～3在不同阶段塔根外侧拉应力变化曲线对比分析见图6。

由图6可知：无论采用方案1、方案2或方案3，成桥后索塔塔根外侧的拉应力均为1.3 MPa。但采用

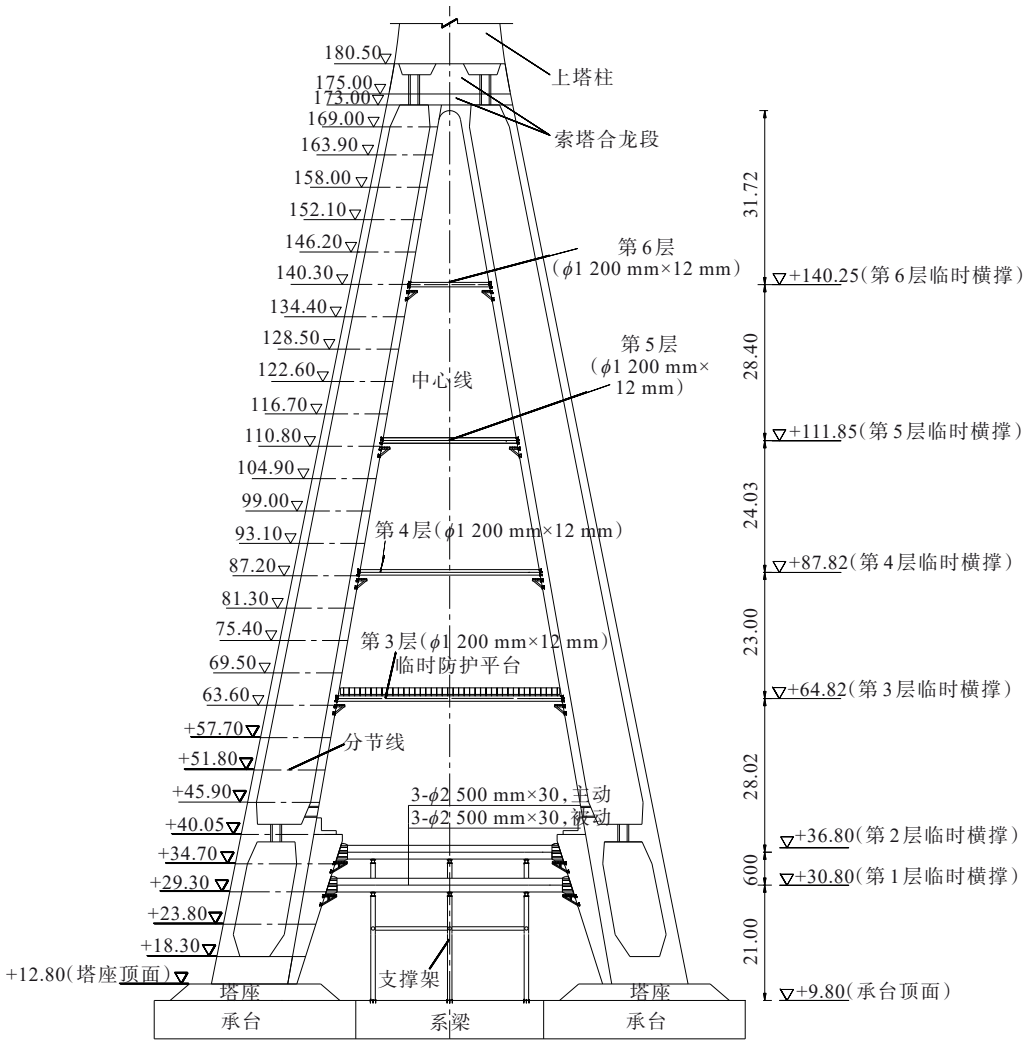

图5　临时横撑总体布置图（单位：m）

Figure 5　Layout of temporary lateral bracings (unit: m)

表4 方案1塔根外侧拉应力

Table 4 Tensile stress at bottom of pylon for scheme 1

序号	施工阶段	工作内容	最大拉应力/MPa	节段顶部水平位移/mm
1	阶段01	主塔1～6节施工，安装第1层横撑	0.66	1.0
2	阶段02	主塔7～8节施工，安装第2层横撑，单根管施加主动力450 t	－0.02	0.5
3	阶段03	主塔9～13节施工，安装第3层横撑	0.54	1.4
4	阶段04	主塔14～17节施工，安装第4层横撑	0.98	4.3
5	阶段05	主塔18～21节施工，安装第5层横撑	0.90	5.9
6	阶段06	主塔22～26节施工，安装第6层横撑	0.64	7.9
7	阶段07	主塔27～30节施工	0.50	0.1
8	阶段08	拆除横撑	3.02	0.2
9	阶段09	主塔31～45节施工（封顶）	2.26	0.9
10	阶段10	全桥合龙	1.30	0.9

方案1，即在索塔合龙后拆除临时横撑，则塔根外侧的拉应力在索塔施工过程中增大至3.02 MPa，超过C55混凝土轴心抗拉强度设计值1.96 MPa，塔根外侧有开裂风险；采用方案2，即在索塔封顶后拆除全部临时横撑，塔根外侧在拆除全部临时横撑后的拉应力为2.26 MPa，也超过C55混凝土轴心抗拉强度设计值1.96 MPa；采用方案3，即索塔封顶后拆除第1和第2层临时横撑，全桥合龙后拆除剩余横撑，全桥施工阶段塔根外侧最大拉应力1.30 MPa，小于C55混凝土轴心抗拉强度设计值1.96 MPa。因而，临时横撑拆除采用方案3。

索塔受风荷载等因素影响，施工过程中最大水平位移为7.9 mm，封顶后塔顶最大水平位移为1.0 mm，均满足设计要求。

4 索塔施工过程模拟的有限元模型及临时横撑强度与稳定性计算

4.1 索塔施工过程模拟的有限元模型

前文中索塔施工过程模拟的荷载取值见表7。

荷载组合如下：① 索塔应力验算：1.0×恒载＋1.0×风荷载；② 索塔刚度验算：1.0×恒载；③ 临时横撑强度验算：1.2×恒载＋1.4×风荷载；④ 横撑稳定性验算：1.2×恒载＋1.4×风荷载。

表5 方案2塔根外侧拉应力

Table 5 Tensile stress at bottom of pylon for scheme 2

序号	施工阶段	工作内容	最大拉应力/MPa	节段顶部水平位移/mm
1	阶段01	主塔1～6节施工，安装第1层横撑	0.66	1.0
2	阶段02	主塔7～8节施工，安装第2层横撑，单根管施加主动力450 t	－0.02	0.5
3	阶段03	主塔9～13节施工，安装第3层横撑	0.54	1.4
4	阶段04	主塔14～17节施工，安装第4层横撑	0.98	4.3
5	阶段05	主塔18～21节施工，安装第5层横撑	0.90	5.9
6	阶段06	主塔22～26节施工，安装第6层横撑	0.64	7.9
7	阶段07	主塔27～30节施工（合龙段）	0.50	0.1
8	阶段08	主塔31～45节施工（封顶）	0.02	0.9
9	阶段09	拆除全部横撑	2.26	1.0
10	阶段10	全桥合龙	1.30	0.9

采用有限元分析软件Midas civil建立索塔模型。模型中索塔和临时横撑采用梁单元进行模拟，索塔底部采用固结约束，合龙段间连接通过弹性支撑的方式等效。全塔有限元模型共划分为1 220个单元、1 260个节点和94个施工步骤。索塔模型见图7。

4.2 确定方案的临时横撑内力计算结果及验算

4.2.1 临时横撑内力计算结果

各层临时横撑在索塔施工各阶段承受的最大轴力及对应弯矩见表8。

4.2.2 临时横撑稳定性验算

以第5层临时横撑为例，对临时横撑钢管杆件及整体稳定性进行计算。第5层临时横撑长度32.9 m，两端与预埋钢板焊接固定。计算长度为：$l_0=32.9\times0.5=16.45$ m，长细比为：$\lambda=\dfrac{l_0}{i}=\dfrac{16.45\times1\,000}{420}=39.2$，钢管属于b类截面，查《钢结构设计标准》（GB 50017—2017）：$\varphi_x=0.901$。双向压弯钢管的整体稳定性计算公式及计算结果如下：

表6　方案3塔根外侧拉应力

Table 6　Tensile stress at bottom of pylon for scheme 3

序号	施工阶段	工作内容	最大拉应力/MPa	节段顶部水平位移/mm
1	阶段01	主塔1～6节施工，安装第1层横撑	0.66	1.0
2	阶段02	主塔7～8节施工，安装第2层横撑，单根管施加主动力450 t	−0.02	0.5
3	阶段03	主塔9～13节施工，安装第3层横撑	0.54	1.4
4	阶段04	主塔14～17节施工，安装第4层横撑	0.98	4.3
5	阶段05	主塔18～21节施工，安装第5层横撑	0.90	5.9
6	阶段06	主塔22～26节施工，安装第6层横撑	0.64	7.9
7	阶段07	主塔27～30节施工（合龙段）	0.50	0.1
8	阶段08	主塔31～45节施工（封顶）	0.02	0.9
9	阶段09	拆除下面两层横撑	0.43	1.0
10	阶段10	全桥合龙后拆除剩余4道横撑	1.30	0.9

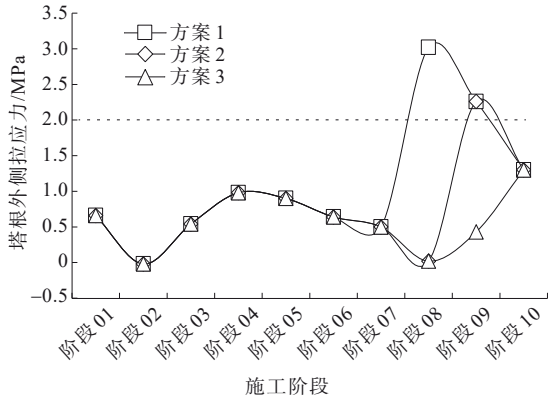

图6　3种方案在不同阶段塔根外侧拉应力变化曲线对比

Figure 6　Comparison of tensile stress curves at bottom of pylon for three schemes at different stages

$$\frac{N}{\varphi_x A f}+\frac{\beta_{mx}M_x}{\gamma_x W_{1x}(1-0.8N/N'_{Ex})f}=0.50<1.0,$$

满足规范要求。公式中各物理量意义参见《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)。

4.2.3　临时横撑强度验算

提取各个施工阶段临时横撑最大组合应力和剪应力见表9。

表7　计算考虑的主要荷载

Table 7　Main loads considered for calculation

序号	荷载名称	荷载大小	单位	加载方式
1	钢筋混凝土自重	26	kN/m^3	自重荷载
2	液压爬模系统	100	t	节点荷载
3	风荷载	计算基准风速34	m/s	梁单元荷载
4	收缩徐变[20]	—	—	输入对应参数

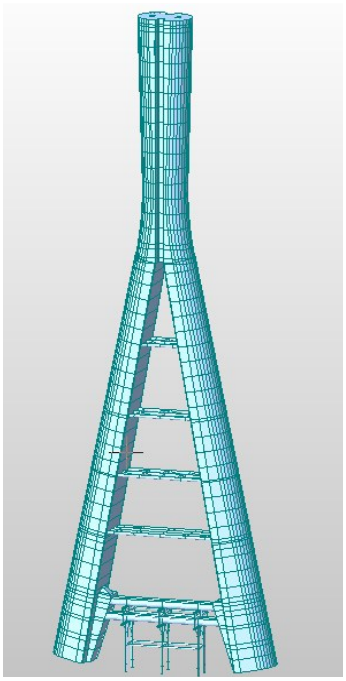

图7　索塔施工阶段有限元模型

Figure 7　Finite element model of pylon in construction stage

表8　临时横撑的最大轴力及对应弯矩

Table 8　Maximum axial force of temporary lateral bracings and corresponding bending moment

临时横撑	最大轴力/kN	对应弯矩/(kN·m)
第1层	1 398.6	790.1
第2层	5 211.8	502.8
第3层	1 220.2	548.8
第4层	2 261.5	384.2
第5层	3 583.8	205.6
第6层	2 288.1	139.7

从计算结果可知：索塔的临时横撑承受的主要荷载为因索塔变形、施加主动力、自重等产生的压弯荷载；临时横撑承受的最大组合应力均小于Q235钢材抗弯承载力设计值205 MPa，承受的剪应力均小于Q235钢材抗剪承载力设计值120 MPa，满足规范要求。临时横撑的结构设计合理可行。

表 9 临时横撑承受最大组合应力、剪应力

Table 9 Maximum combined stress and shear stress of temporary lateral bracings

序号	施工阶段	组合应力/MPa	剪应力/MPa
1	阶段01	—	—
2	阶段02	18.8	1.7
3	阶段03	43.1	3.7
4	阶段04	75.9	3.7
5	阶段05	87.8	3.7
6	阶段06	108.8	3.7
7	阶段07	103.9	3.7
8	阶段08	98.5	3.8
9	阶段09	99.5	3.7
10	阶段10	—	—

5 临时横撑上缘塔肢外侧应力分析

临时横撑设计时除了应确保塔根外侧的拉应力不超限，还应确保施工过程中临时横撑上缘塔肢外侧的拉应力不超限。经分析，各层临时横撑上缘塔肢外侧在各个施工阶段均未出现拉应力。限于篇幅，仅给出各施工阶段第1层和第2层临时横撑上缘塔肢外侧应力，见表10。

表 10 第1层、第2层临时横撑上缘塔肢外侧应力

Table 10 Stress at upper pylon limb of first and second temporary lateral bracings

施工阶段	横撑上缘塔肢外侧应力/MPa		施工阶段	横撑上缘塔肢外侧应力/MPa	
	第1层	第2层		第1层	第2层
阶段01	—	—	阶段06	−1.36	−1.11
阶段02	−0.50	−0.27	阶段07	−2.00	−1.73
阶段03	−0.40	−0.29	阶段08	−2.74	−2.36
阶段04	−0.27	−0.16	阶段09	—	—
阶段05	−0.60	−0.42	阶段10	—	—

6 结论

（1）本文将桥塔倾斜塔肢施工的临时横撑确定受力安全原则简化为“塔肢应力不超标”，既简化了横撑布置的确定方法，又减少了横撑总数量和主动横撑数量。

（2）采用本文简化的受力安全原则确定香山大桥的临时横撑方案，仅需6层临时横撑，且仅需对第2层施加主动力。较悬臂长度相当但倾角更小的武汉青山长江公路大桥，香山大桥的横撑总数量，特别是主动横撑数量大为减少。该方案降低了造价，缩短了工期。

（3）通过对香山大桥索塔临时横撑拆除时机进行分析，确定了临时横撑拆除的合理时机，进一步消除了塔根外侧混凝土开裂的风险。

（4）香山大桥索塔按本文论证的方案施工，索塔未产生任何裂缝，索塔轴线偏差也在设计容许范围内，达到预期目标。

参考文献：

References：

[1] 徐青.曲面异形桥塔主动横撑布设与计算[J].铁道建筑技术,2023(3): 77-79,113.
XU Qing. Layout and stress calculation of active cross-brace in construction of curved special-shaped bridge tower[J]. Railway Construction Technology, 2023(3): 77-79,113.

[2] 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(4): 22-26.
WANG Jie, XU Qili. Design of truss type temporary transverse bracing for pylons of Yuanhong navigational channel bridge of Pingtan Straits Rail-Cum-Road Bridge [J].World Bridges,2018,46(4): 22-26.

[3] 贺玖龙.斜拉桥异形索塔施工中临时水平横撑的应用研究[D].西安: 长安大学,2015.
HE Jiulong. Research on the application of temporary horizontal braces in the construction of cable-stayed bridge[D].Xi'an: Chang'an University,2015.

[4] 裴山,陈常松.嘉鱼长江公路大桥索塔应力及线形施工控制[J].中外公路,2020,40(3): 146-150.
PEI Shan, CHEN Changsong. Construction control of pylon stress and geometry control of Jiayu Yantze River Highway Bridge[J].Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(3): 146-150.

[5] 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(9): 105-111.
LYU Changrong, WANG Yan. Application research of temporary cross bracing construction plan optimization of inward tilting cable-stayed bridge tower[J].Highway,2018, 63(9): 105-111.

[6] 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(增刊1): 100-105.
ZHAO Quancheng,LIU Xiaobo,ZUO Xiaoming.Design of temporary lateral bracings for north pylon of Qingshan Changjiang River Highway Bridge in Wuhan[J]. Bridge Construction,2020,50(sup 1): 100-105.

[7] 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.
TONG Zhifeng, XIONG Lei, LIU Xiaoqi, et al. Study on key design parameters of the constructional safety of the leaning single-tower cable-stayed bridges[J]. Journal of

China & Foreign Highway,2022,42(4): 47-52.

[8] 方哲形,叶以挺,吴刚.舟岱跨海大桥异形索塔临时横撑设计与计算分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(3): 114-117.
FANG Zhexing, YE Yiting, WU Gang. Design and calculation analysis of temporary cross brace of special-shaped pylon of Zhoudai Sea-Crossing Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2020, 16(3): 114-117.

[9] 严瑾.独塔斜拉桥主塔主动横撑结构计算[J].公路工程,2017,42(3): 180-183.
YAN Jin. The calculation of active transverse bracing structure of the single pylon cable-stayed bridge main tower[J].Highway Engineering,2017,42(3): 180-183.

[10] 秦顺全,张金涛,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔方案研究[J].桥梁建设,2021,51(4): 1-9.
QIN Shunquan,ZHANG Jintao,LU Qinfeng,et al.Research on pylon types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J].Bridge Construction, 2021,51(4): 1-9.

[11] 陈正,于志兵,徐代宏,等.临港公铁两用长江大桥主桥桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2023,53(1): 123-129.
CHEN Zheng, YU Zhibing, XU Daihong, et al. Key pylon construction techniques for main bridge of Lingang Changjiang River Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction,2023,53(1): 123-129.

[12] 常大宝.独柱型钢塔分离式钢箱梁斜拉桥塔梁施工关键技术[J].桥梁建设,2020,50(增刊2): 121-126.
CHANG Dabao. Key pylon and girder construction techniques for cable-stayed bridge with mono-columned pylons and two separated steel boxes[J]. Bridge Construction,2020,50(sup 2): 121-126.

[13] 李军堂.沪通长江大桥主航道桥桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(6): 1-6.
LI Juntang. Key construction techniques for pylons of main navigational channel bridge of Hutong Changjiang River Bridge[J].Bridge Construction,2019,49(6): 1-6.

[14] 王东辉,韩冰.平潭海峡公铁两用大桥通航孔桥桥塔施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(3): 1-5.
WANG Donghui, HAN Bing. Key techniques for construction of pylon of channel bridge of Pingtan Straits Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 1-5.

[15] 张春新,张晶,胡海波.武汉青山长江公路大桥北塔施工关键技术[J].桥梁建设,2019,49(2): 1-6.
ZHANG Chunxin, ZHANG Jing, HU Haibo. Key techniques for construction of north pylon of Qingshan Changjiang River Bridge in Wuhan[J]. Bridge Construction, 2019,49(2): 1-6.

[16] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.

[17] 刘增武,辛景舟,周水兴,等.异形索塔斜拉桥参数敏感性分析[J].中外公路,2020,40(5): 76-80.
LIU Zengwu, XIN Jingzhou, ZHOU Shuixing, et al. Analysis of parametric sensitivity of cable-stayed bridge with shaped single tower[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5): 76-80.

[18] 蒋建军,田波,何锋,等.斜拉桥曲线形钻石桥塔抗裂设计研究[J].世界桥梁,2019,47(4): 12-16.
JIANG Jianjun, TIAN Bo, HE Feng, et al. Study of anti-cracking design for diamond-shaped curved pylon of cable-stayed bridge[J].World Bridges,2019,47(4): 12-16.

[19] 卫军,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(4): 113-118.
WEI Jun, ZENG Zhihao, LI Dingyou. Comparison and selection of schemes of temporary cross bracings for construction of special-shaped arch pylons of a cable-stayed bridge[J].Bridge Construction,2017,47(4): 113-118.

[20] 王生武,项纯夫,李腾腾,等.异形独塔斜拉桥参数敏感性分析[J].公路工程,2015,40(1): 137-142,147.
WANG Shengwu, XIANG Chunfu, LI Tengteng, et al. Analysis of parameters' sensitivenes of cable-stayed bridge with shaped single tower[J].Highway Engineering, 2015,40(1): 137-142,147.