

DOI: 10.7672/sgjs2026080074

常泰长江大桥索塔下横梁施工过程精细化分析*

袁 灿¹, 王 辉^{1,2}, 厉勇辉^{1,3,4}, 康学云^{1,2}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241060;

3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040;

4. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 常泰长江大桥索塔采用空间4塔肢钻石形组合结构, 索塔下横梁采用不分层混凝土浇筑方案, 一次性混凝土浇筑方量大, 下横梁施工过程空间受力复杂、截面大、跨度长。下横梁线形、内力和支架结构形式与下横梁混凝土浇筑顺序、计算分析模拟密切相关。提出双重单元有限元模拟方法, 模拟下横梁混凝土呈流态到混凝土凝固形成刚度的全过程, 结构内力和下横梁变形的计算结果更为准确; 4塔肢下横梁混凝土浇筑顺序对结构影响较小, 采用分离式支架可以有效减小下横梁混凝土浇筑过程对塔肢结构内力的影响, 受力更加明确, 可以消除下横梁合龙口的相对高差。

[关键词] 桥梁; 索塔; 下横梁; 浇筑; 支架; 双重单元; 精细化分析

[中图分类号] U445.4; U448.27

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0074-05

Detailed Analysis of Construction Process of Lower Beam of Cable Tower of Changtai Yangtze River Bridge

YUAN Can¹, WANG Hui^{1,2}, LI Yonghui^{1,3,4}, KANG Xueyun^{1,2}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. CCCCSHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241060, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: The cable tower of Changtai Yangtze River Bridge adopts space four tower legs diamond shaped composite structure. The lower beam of the cable tower adopts the non layered pouring scheme, with a large amount of pouring at one time. The construction process of the lower beam has complex spatial stress, large section and long span. The shape, internal force, calculation and analysis method, support structure form of the lower beam are related to the pouring sequence of the lower beam. In this paper, a dual element finite element simulation method is proposed to simulate the whole process from the flow state of the lower beam concrete to the formation of the stiffness of the concrete solidification. The calculation results of the structural internal force and the deformation of the lower beam are more accurate. The pouring sequence of the lower cross beam of four tower legs has little impact on the structure. The use of separate support can effectively reduce the impact on the internal force of the tower leg structure during the pouring process of the lower cross beam, make the stress more clear, and eliminate the relative height difference of the closure of the lower cross beam.

Keywords: bridges; cable tower; lower beam; pouring; supports; dual unit; detailed analysis

1 工程概况

常泰长江大桥是世界上最大跨径斜拉桥, 跨径达1 208m, 集高速公路、城际铁路、一级公路“三位

* 中交集团科研课题(2020-ZJKJ-03)

[作者简介] 袁 灿, 高级工程师, E-mail: 1137627597@qq.com

[通信作者] 王 辉, 高级工程师, E-mail: 348566595@qq.com

[收稿日期] 2025-10-20

一体”,索塔高度达到 350m,是世界上最高索塔,索塔结构新颖,为空间钻石形混合索塔结构,中、下塔肢为空间钻石形混凝土结构,下塔柱高 48.5m,中塔柱高 182.6m,上塔柱为钢箱-核芯混凝土结构,上塔柱高 118.9m^[1-3],如图 1 所示。

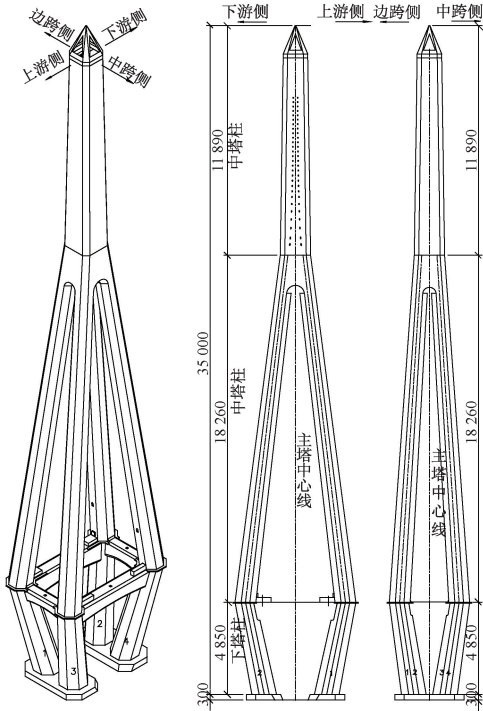


图 1 索塔结构(单位:cm)

Fig. 1 Structure of cable tower(unit:cm)

索塔下横梁分为纵桥向横梁和横桥向横梁,下横梁采用变截面设计,顶部为水平,底部为圆弧曲线,横向下横梁长约 40m,跨中设 1 道 2m 宽的后浇段,跨中梁高 8m、宽 7m,横梁整体向外倾斜,最大倾角 12.67°。纵向下横梁总长约 20m,跨中设 2m 宽的后浇段,跨中梁高 6m、宽 6m,纵梁整体向外倾斜,最大倾角 9.88°,如图 2 所示。

为提高下横梁混凝土表面美观,避免分层缝,常泰大桥下横梁沿高度方向不分层浇筑,4 个下横梁分 4 个 L 形浇筑,单次浇筑方量达到 2 000m³,如图 3 所示。

下横梁在空间上受力复杂、跨度大、混凝土浇筑体量大,线形控制严格。以上特点都对下横梁有限元计算模型的合理性、精确性提出了更高的要求,另外塔柱受力和横梁线形与下横梁混凝土浇筑顺序、支架形式有关^[4-9]。

2 下横梁精细化模拟分析

2.1 下横梁仿真模拟分析方法

1) 一次激活法:分析过程中直接激活具有刚度与自重的下横梁单元,以模拟下横梁混凝土浇筑完

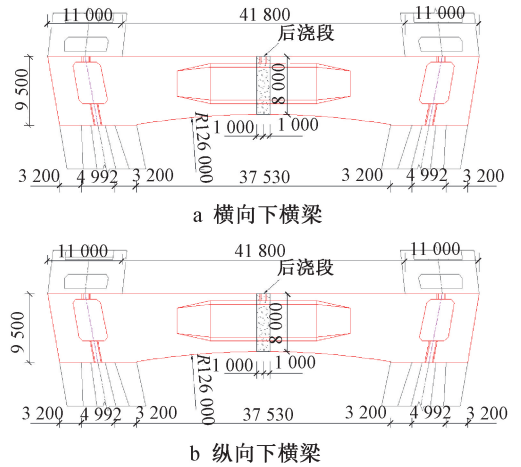


图 2 下横梁结构

Fig. 2 Structure of lower beam

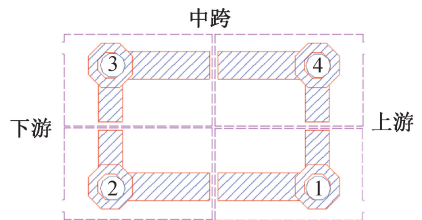


图 3 下横梁编号

Fig. 3 Numbering of lower beam

成的工况,不能考虑混凝土硬化过程。

2) 等效荷载法:下横梁为有刚度无自重单元,下横梁自重以荷载形式加载到支架和下横梁上,混凝土浇筑过程中下横梁自重以线性荷载等效施加在底部支架上,然后激活下横梁单元,支架拆除后在下横梁上施加下横梁自重线性荷载,该方法可以模拟混凝土浇筑和硬化过程,但是无法精确模拟下横梁线形,尤其是浇筑工况下横梁线形^[4]。

针对上述模拟方法存在的问题,本文提出了一种针对下横梁沿高度方向不分层浇筑工艺的双重单元模拟方法,下横梁双重单元由 2 个单元共用节点组成,第 1 个单元是有质量无刚度梁单元,由于梁单元无抗弯刚度,模型计算不收敛,下横梁刚度在实际截面刚度基础上考虑 10^{-6} 折减系数;第 2 个单元是有刚度无质量梁单元,有限元模型中材料重度为 0。下横梁仿真分析过程中先激活无刚度、有重度的下横梁单元模拟混凝土浇筑过程中的流态阶段,此时下横梁混凝土自重完全由支架承受,待下横梁结硬后,激活有刚度、无重度的下横梁单元,此时下横梁单元应力为 0,后续预应力等荷载再由下横梁混凝土单元自身承担,待下横梁合龙完成后,拆除支架。

2.2 计算结果对比分析

采用 MIDAS Civil 软件建立塔座、塔肢、下横梁

和支架三维协同受力有限元分析模型,塔座、塔肢、下横梁和支架均采用梁单元模拟,塔座底部和支架底部固结,支架附墙和塔肢之间采用铰接弹簧连接,支架分配梁和下横梁之间采用只受压弹簧模拟,塔肢单元最大长度为 6m,最小单元尺寸为 1m,下横梁单元尺寸为 0.5m,有限元模型中主要考虑荷载有结构自重,钢筋、模板质量和液压爬模质量以及混凝土收缩徐变和预应力筋荷载,有限元模型如图 4 所示。

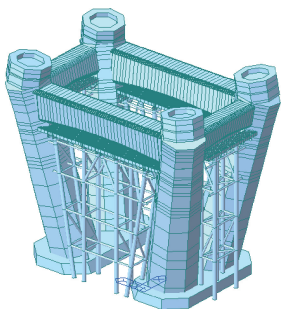


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

采用上述不同模拟方法分别对常泰长江大桥下横梁浇筑过程中塔肢内力、下横梁内力、支架内力以及下横梁变形等进行计算并对比分析其结果。横桥向下横梁与纵桥向下横梁对比计算结果呈现相似的规律,为避免对比分析过程过于繁琐,下文下横梁计算结果均指横向下横梁计算结果。

1) 塔肢底部弯矩对比分析

在相同施工顺序和考虑相同施工荷载情况下,不同下横梁模拟方式计算所得塔肢底部弯矩如图 5 所示(塔肢向内为正),计算结果表明:一次激活法所得塔柱弯矩大于等效荷载法和双重单元法,等效荷载法和双重单元法塔柱底部弯矩比较接近,一次性激活法没有考虑混凝土硬化过程,下横梁和下横梁支架共同承担混凝土自重,导致塔柱根部内力过大。

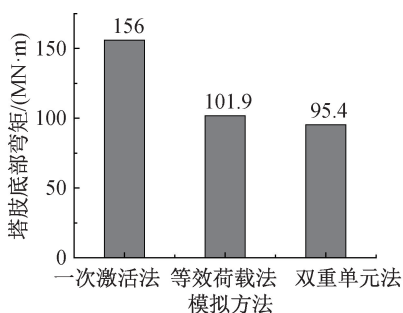


图 5 塔柱弯矩对比

Fig. 5 Comparison of the tower column bending moment

2) 下横梁内力对比分析

不同下横梁模拟方式计算所得下横梁最大弯矩计算结果如图 6 所示。计算结果表明:等效荷载法与双单元模拟法计算所得下横梁最大弯矩大于一次激活法,对于等效荷载法与双单元模拟法而言,从浇筑混凝土到张拉预应力之前,下横梁处于弯矩、应力均为 0 的状态,其弯矩主要由预应力所产生;而对于一次激活法而言,下横梁混凝土单元激活后,受混凝土自重作用,下横梁单元存在一个较大的负弯矩,将预应力产生的弯矩抵消了一部分,导致一次激活法所得下横梁最大弯矩计算结果小于其余两种方法。

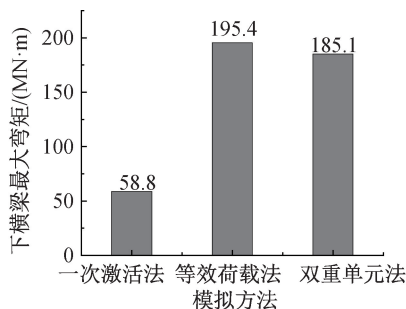


图 6 下横梁弯矩对比

Fig. 6 Comparison of the lower beam bending moment

3) 支架立柱轴力对比分析

不同下横梁模拟方式计算所得临时支架立柱轴力计算结果如图 7 所示。计算结果表明:双重单元法与等效荷载法所得支架立柱所受轴力大于一次激活法,其原因与前文所述计算塔肢底部弯矩时,一次激活法计算结果偏大的原因一致,即一次激活法过早激活下横梁刚度,低估了支架所承担的内力。

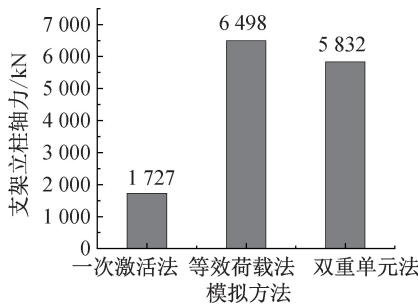


图 7 支架立柱轴力对比

Fig. 7 Comparison of the axial force of the support column

4) 下横梁线形对比分析

不同下横梁模拟方式计算得到下横梁完成预应力张拉后,合龙口位置处最大竖向位移结果如图 8 所示(正值表示位移方向向下)。计算结果表明:

双重单元法对下横梁位移的计算结果大于一次激活法与等效荷载法,主要原因是一次激活法过早激活下横梁混凝土单元刚度,使本应全部由临时支架承担的下横梁混凝土自重,一部分由索塔结构自身承担,等效荷载法则由于湿重直接施加于临时支架,且无法考虑支架与下横梁之间的协同变形,因此无法对浇筑过程中下横梁的竖向位移进行准确模拟。双重单元法考虑了浇筑过程中下横梁与临时支架的协同变形,可以较为准确计算得到下横梁预拱度。

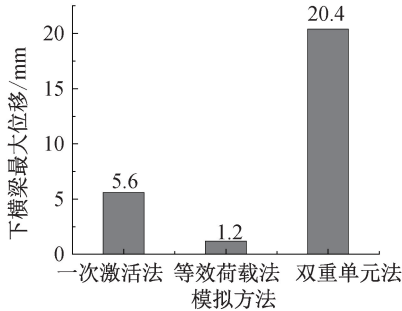


图 8 下横梁位移对比

Fig. 8 Comparison of the lower beam displacement

3 索塔下横梁浇筑顺序影响分析

常泰长江大桥采用钻石形主塔,相较于常规主塔,其下横梁结构空间上受力更为复杂,且下横梁混凝土采用一次浇筑而非分层浇筑,难以在浇筑过程中即时调整线形,因此需要合理选择混凝土浇筑顺序,探究不同下横梁混凝土浇筑顺序对结构受力、变形等方面的影响。本文采用 3 种不同下横梁混凝土浇筑顺序进行计算分析,分别为:对角浇筑,①→③→②→④;顺时针浇筑,①→②→③→④;逆时针浇筑,①→④→③→②。

预应力筋张拉完成后,结构内力与下横梁变形计算结果如表 1 所示,计算结果表明:下横梁不同浇筑顺序对结构内力与下横梁变形的影响较小。

表 1 不同浇筑顺序计算结果对比

Table 1 Calculation results comparison for different sequences

项目	对角浇筑	顺时针浇筑	逆时针浇筑
塔肢底部弯矩/(MN·m)	95.4	93.8	95.4
下横梁最大弯矩/(MN·m)	185.1	185.6	185.9
支架立柱最大轴力/kN	5 832	5 253	5 261
下横梁最大变形/mm	20.4	20.5	20.5

4 不同支架结构形式影响分析

常泰长江大桥下横梁混凝土浇筑用临时支架为落地钢管支架,单个横梁设置 8 根 $\phi 1200 \times 14$ 钢管立柱,塔柱侧面设有牛腿,立柱顶设置桩帽、卸荷

块、主横梁、主纵梁、分配梁和拱架。支架采用分离式设计,即在下横梁跨中位置将主纵梁断开,并采用斜撑支撑断开位置主横梁,如图 9a 所示。常规整体式支架设计如图 9b 所示,由钢管立柱及横联形成支架整体结构,主纵梁通长设置与主横梁焊接牢固。两种结构分配梁均与主纵梁焊接,由分配梁传递下横梁混凝土浇筑时的混凝土自重。

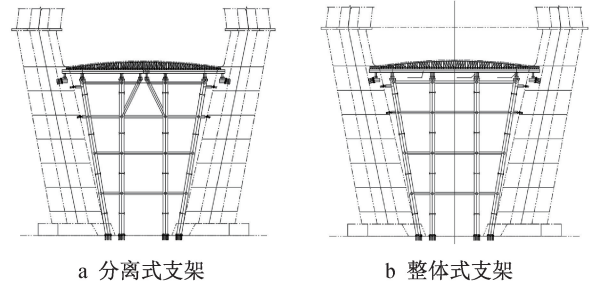


图 9 下横梁支架设计

Fig. 9 Design of the lower beam bracket

2 种支架结构形式主要区别在于:①整体式支架主纵梁通常对于塔肢存在一定的约束作用,而分离式的支架对于塔肢几乎无约束作用;②整体式支架在一端下横梁浇筑完成后,由于支架的整体变形,可能影响另一端下横梁的浇筑线形,而分离式支架则对此影响很小。

2 种支架形式下结构内力计算结果如表 2 所示。

表 2 不同支架形式计算结果对比

Table 2 Calculation results comparison for different types of supports

项目	分离式支架	整体式支架
塔肢底部弯矩/(MN·m)	95.4	258.3
下横梁最大弯矩/(MN·m)	185.1	198.6
支架立柱最大轴力/kN	5 832	5 682
下横梁最大变形/mm	20.4	21.0

1) 下横梁预应力张拉完成后,整体式支架方案塔肢底部弯矩大于分离式支架方案。其主要原因在于,下横梁现浇阶段,分离式支架将对塔肢产生一个向外的作用力,而对整体式支架而言,其顶部受到竖向荷载时,对塔肢的作用力方向向内。

2) 分离式支架方案支架立柱轴力略小于整体式支架方案,这主要是因为整体式支架通过支架顶部分配梁承受轴力,将部分下横梁自重荷载传递至塔肢结构。

3) 不同支架形式对于下横梁的内力与变形影响不明显,说明 2 种支架方案对下横梁的竖向支撑作用区别不大。

除受力以外,分离式支架设计可以减小由下横梁分批浇筑混凝土带来的合龙口相对高差,采用整体式支架时下横梁合龙口存在 4.2mm 的高差,分离式支架可使此合龙口高差减至 0.1mm。分离式支架对于下横梁线形的严格控制更加符合涉铁桥梁对线形的要求。

5 结语

1) 双重单元法可以较精确计算结构内力和下横梁混凝土浇筑线形。

2) 空间 4 塔肢索塔下横梁不同的混凝土浇筑顺序对于结构内力与下横梁变形的影响较小,可根据现场施工布置合理设置浇筑顺序。

3) 下横梁采用一次性浇筑,下横梁支架采用分离式支架设计可以有效减小浇筑过程中塔肢所受内力,同时消除下横梁合龙口处的相对高差。

4) 下横梁施工采用了分离式支架,浇筑顺序为③→④→①→②,采用双重单元法对下横梁施工过程进行模拟,综合考虑计算设置预拱度后,下横梁线形与设计线形最大误差 $\leq 3\text{mm}$ 。

参考文献:

- [1] 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 S Q,ZHANG J T,LU Q F, et al. Research on pylon types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction,2021,51(4):1-9.
- [2] 胡勇.常泰长江大桥主航道桥桥塔基础选型研究[J].桥梁建设,2021,51(2):1-9.
HU Y. Research on pylon foundation types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction,2021,51(2):1-9.
- [3] 秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3):1-10.

QIN S Q, XU W, LU Q F, et al. Overall design and concept development for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction, 2020, 50(3): 1-10.

- [4] 高有德.云南江底河特大桥索塔下横梁支架设计与施工[J].山西建筑,2021,47(18):141-145.
GAO Y D. Design and construction of beam support under the cable pylon of Jiangdi River Bridge in Yunnan Province[J]. Shanxi architecture, 2021, 47(18): 141-145.
- [5] 王汉章,曹振杰,兰晴朋.宜昌伍家岗长江大桥下横梁施工过程中内力分配模式研究[J].中外公路,2021,41(3):135-140.
WANG H Z, CAO Z J, LAN Q P. Study on internal force distribution mode of lower crossbeam of Yichang Wujiagang Yangtze River Bridge during construction stages[J]. Journal of China & foreign highway, 2021, 41(3): 135-140.
- [6] 刘智.大跨径悬索桥塔下横梁施工关键技术研究[D].西安:长安大学,2011.
LIU Z. Construction technical analysis of long-span suspension bridge tower lower cross-member [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [7] 周乐木,孙开武,殷源,等.棋盘洲长江公路大桥南塔下横梁施工关键技术[J].土木工程与管理学报,2019,36(6):56-60.
ZHOU L M, SUN K W, YIN Y, et al. Lower cross beam construction technology of the south tower of Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge [J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(6): 56-60.
- [8] 罗显平,翁方文,郑建新.大跨斜拉桥索塔施工及控制技术研究[J].公路,2017,62(5):86-90.
LUO X P, WENG F W, ZHENG J X. Research on construction and control technology of tower of long-span cable-stayed bridge[J]. Highway, 2017, 62(5): 86-90.
- [9] 张博.铁路劲性骨架钢管混凝土拱桥施工过程仿真分析[D].天津:河北工业大学,2017.
ZHANG B. The Construction simulation of railway concrete-filled steel tube skeleton arch bridge[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.

(上接第14页)

- [11] 许梁.基于三维激光扫描技术的结构检测方法研究[D].济南:山东建筑大学,2024.
XU L. Research on structural detection method based on 3d laser scanning technology[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [12] 宋玉喜.三维激光扫描技术在室内三维实景模型重建中的应用[J].科技创新与应用,2025,15(15):165-168.
SONG Y X. Application of 3D laser scanning technology in the reconstruction of indoor 3D real-scene models [J]. Technology innovation and application, 2025, 15(15): 165-168.
- [13] 朱鸣,王春磊.使用犀牛软件及 Grasshopper 插件实现双层网壳结构快速建模[J].建筑结构,2012,42(S2):424-427.
ZHU M, WANG C L. Applying of Rhinoceros software and

Grasshopper plug-in for quick structural modeling of double-layer reticulated shells [J]. Building structure, 2012, 42(S2): 424-427.

- [14] 孙晓阳,张博玮,张有志,等.基于Rhino的中国传统建筑大木结构BIM技术应用[J].施工技术(中英文),2025,54(13):135-139.
SUN X Y, ZHANG B W, ZHANG Y Z, et al. Application of BIM in wooden structures in traditional Chinese architecture based on Rhino[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 135-139.
- [15] 中国建筑科学研究院.空间网格结构技术规程:JGJ 7—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. Technical code for spatial grid structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.