

Research on Analytical Methods of Computational Mechanics in Bridge Pier Beam System

Huang Yuhuan^{1,*}, Ding Shihong², Niu Zhongrong³, Hu Zongjun³, Zhou Mi¹, Li Guanghao¹

¹Zhejiang Communications Group Testing Technology Co., Ltd, Hangzhou, China

²Steel Structure Construction Co. Ltd. of China Tiesiju Civil Engineering Group, Hefei, China

³School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, China

Email address:

532669750@qq.com (Huang Yuhuan)

*Corresponding author

To cite this article:

Huang Yuhuan, Ding Shihong, Niu Zhongrong, Hu Zongjun, Zhou Mi, Li Guanghao. Research on Analytical Methods of Computational Mechanics in Bridge Pier Beam System. *Science Discovery*. Vol. 11, No. 2, 2023, pp. 50-54. doi: 10.11648/j.sd.20231102.14

Received: March 13, 2023; Accepted: April 17, 2023; Published: April 23, 2023

Abstract: A double-track bridge consists of deck continuous steel-truss beam structure. Because there are 151.5m cantilever erection cases in the construction process of steel-truss bridge from side pier to main pier, the two super-high piers with height of 110.9m and 133.5m are set at 81m distance from two side piers to shorten the cantilever erection length of steel-truss bridge. In order to simulate the contact problem of the piers and the steel truss beam, a new mechanical method is developed to simulate the non-linear contact of the pier and beam system in cantilever erection process. The mechanical model is combined with finite element method software. Then the iterative trial calculation and feedback adjustment operation mechanism are used in the finite element analyses of the whole erection process of steel truss bridge. Thus the reaction forces of latticed super high pier and its stress variation under different environmental temperature conditions in each construction stage are obtained. Based on accurate analysis of the stress status of the super-high piers subjected to the steel truss beam bridge, the reasonable suggestions are proposed for the construction of the steel truss beam and the piers, providing a simple analysis method for the construction calculation of the latticed super high pier.

Keywords: Steel Truss Beam, Latticed Super High Pier, Contact, Mechanical Analysis, FEM

计算力学在桥梁墩梁系统中的分析方法研究

黄煜寰^{1*}, 丁仕洪², 牛忠荣³, 胡宗军³, 周密¹, 李光浩¹

¹浙江省交通集团检测科技有限公司, 杭州, 中国

²中铁四局集团钢结构建筑有限公司, 合肥, 中国

³合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥, 中国

邮箱

532669750@qq.com (黄煜寰)

摘要: 某双线特大桥采用上承式连续钢桁梁结构, 由于钢桁梁桥从边墩至主墩的架设过程中有151.5m的悬臂架设工况, 故在距边墩81 m处设置高度分别为110.9, 133.5m的格构式超高支墩以缩短钢桁梁桥悬臂架设长度。本文建立了一种有效力学分析方法模拟墩梁支撑钢桁梁悬臂架设过程的非线性接触情况, 将理论分析模型结合到有限元软件中, 运用迭代试算、反馈调节运算方法对钢桁梁桥架设全过程进行分析, 从而得出施工阶段不同环境温度工况下格构式高支墩支反力与其应力。基于钢桁梁与格构式超高支墩结构整体模型分析结果, 提出了钢桁梁下落格构式超高支墩施工中的关键技术, 为格构式高支墩抄垫施工计算提供简便的分析方法。

关键词：钢桁梁桥，格构式超高支墩，接触，力学分析，有限元法

1. 引言

随着我国铁路运输事业的蓬勃发展，钢桁梁桥被广泛运用在高速铁路桥梁建设中。大跨度高速铁路桥梁在架设过程中普遍存在较长距离的悬臂架设阶段，为减小主梁大悬臂施工所引起的弯矩影响，通常采取临时支撑措施完成施工阶段体系转换。格构式超高支墩因具有较强的适应性，施工简便、工程经济等优势而被广泛运用于临时固结系统中。在架设阶段，格构式超高支墩承受较大的主梁荷载与风荷载，且其与主梁的接触与荷载传递规律较为复杂，所以格构式超高支墩与钢桁梁桥构成墩梁系统的受力形式通常被视为高速铁路桥梁悬臂架设过程中的关键形式。

由于传统的短跨径桥梁无法满足在山高坡陡沟深的河谷地区建设，钢桁梁桥与格构式超高支墩组成的墩梁系统被广泛运用[1-10]。陈仕刚等[11]以二郎河特大桥超高支墩的设计为背景，提出等截面格构式支墩可满足桥梁的施工要求和质量，在施工进度中有明显的优势。李文杰等[12]通过对瑞九铁路庐山站下承式简支钢桁梁特大桥的格构式高支墩应力和线形进行了施工过程分析和监控，提出设置格构式高支墩可为钢桁梁施工提供安全性支持。在钢桁梁桥与桥墩刚结点组合的问题研究中，吉伯海等[13]提出在钢桁梁桥下部增设连续梁的方法将刚结点部分下移到桥墩的顶部。但是在钢桁梁桥悬臂施工过程中，桥梁与格构式高支墩的连接并非是单纯的刚性连接，随着钢桁梁桥悬臂长度的不断增长，格构式高支墩的受力也逐渐增加。在对多跨连续梁的支座脱空问题的研究中，雷素敏[14]对支座脱空与未脱空情况进行研究，发现在多跨连续梁的施工过程中，

需要对支座的布设进行合理的安排，预防因支座脱空问题带来的不利影响。在钢桁梁支反力过大问题的研究中，王娣等[15]提出顶推施工算法和格构式高支墩标高调整优化设计，为顶推施工模拟提供了简便算法，并对比分析了钢桁梁桥与格构式超高支墩支撑计算方法中接触单元法和强制位移法的优劣性，得出强制位移法更适用于墩梁的连接计算。墩梁接触问题复杂，且格构式高支墩在主梁架设过程中非常重要，而常规的计算方法无法满足墩梁系统在悬臂架设过程中协同作用的体现，因此对格构式超高支墩在设计阶段的结构力学性能评估仍需深入研究。

本文结合墩梁支撑计算方法中的接触单元法和强制位移法，提出一种有效计算力学分析方法模拟格构式高支墩与钢桁梁的协同作用，解决钢桁梁悬臂架设全过程墩与梁的非线性接触情况。通过建立有限元模型得到了在钢桁梁悬臂阶段不同环境温度工况下格构式高支墩支反力与其应力。

2. 工程概况

新建双线特大桥属于欧亚大陆高速铁路运输网络南部通道中老国际铁路的中国境内组成部分之一，该桥采用上承式连续钢桁梁结构，全长832 m，钢桁梁桥总质量约21 000 t。该桥跨越山高坡陡沟深的V字形河谷地带，地形地貌复杂，地势高差较大，为桥墩的施工部署增加了难度。桥梁共设置2个主墩，2个边墩，并在边墩与主墩之间距边墩81 m处设置高度分别为110.9 m，133.5 m的格构式超高支墩以缩短钢桁梁桥悬臂架设长度。其立面布置如图1所示。

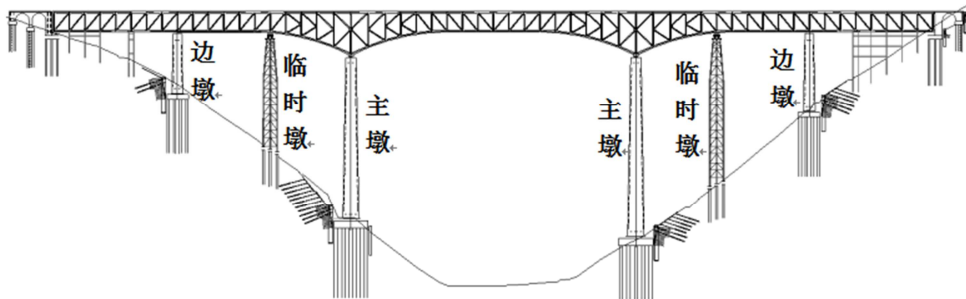


图1 双线特大桥钢梁架设辅助工程立面布置。

3. 墩梁接触力学分析模型

在模拟结构物之间接触、分离等非线性力学现象中，运用经典弹性理论中的接触单元法已无原则上的难度，且能够输出满意的计算结果。然而，对于格构式高支墩与桁梁接触结构而言，采用接触单元法不仅消耗大量的计算时间，而且计算过程相当繁复。本文提出一种力学分析模型，主要由上下两个单元构成。模型上部单元采用可根据工程实际调节弹性模量和单元长度的杆单元，由于其调节的弹性模量很低，故称为“棉花杆单元”，见图2。图2中的a、b、

c点均代表为棉花杆单元和垫块单元的实际节点位置， L_1 为模拟真实的垫块高度 L_2 为假想的棉花杆单元长度。由于格构式高支墩为钢属性材料，考虑其在竖直方向上的位移对温度变化较为敏感，故棉花杆单元长度需要根据温度荷载的状态进行二次适应。模型下部单元为普通杆单元，长度由棉花杆单元下节点和桥墩结构顶部节点确定，材料与桥墩顶部垫块材料属性相同。下部单元释放下端梁端约束，与下部结构处于铰接状态，棉花杆单元释放上端梁端约束，与上部结构处于铰接状态。上部单元与下部单元刚接，轴线方向为竖直方向，其轴向力即为钢桁梁传递到格构式高支墩的作用力。

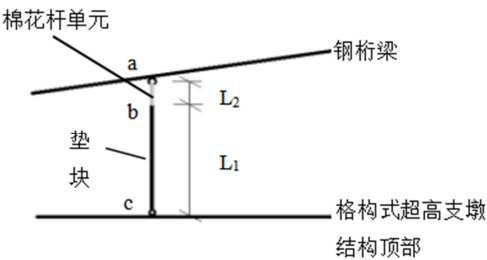


图2 钢桁梁与格构式超高支墩接触力学分析模型。

将此力学分析模型运用于本桥梁实际施工中，将钢桁梁结构在格构式高支墩上方接触节点自由下挠的挠度作为棉花杆单元初始值。考虑钢桁梁自重、桥面施工荷载与架梁吊机荷载的作用，经有限元计算得到钢桁梁位移云图见图3。可知，钢桁梁接触节点自由端的挠度为295 mm。由

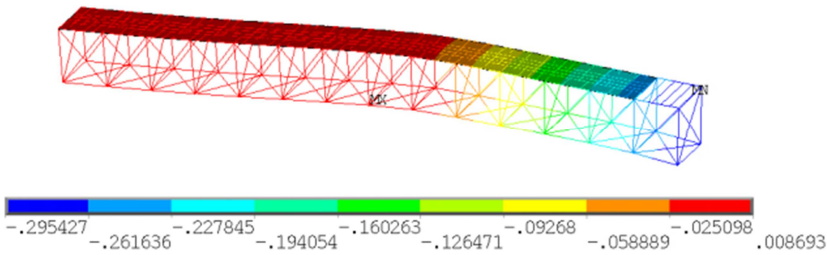


图3 钢桁梁位移云图（单位：m）。

4. 格构式超高支墩受力全过程力学分析

4.1. 墩梁系统格构式超高支墩支反力分析

本文中格构式超高支墩受力全过程主要集中在钢桁梁桥落在格构式超高支墩后向主桥墩方向悬臂架设节段，

于格构式超高支墩属于超高钢结构构件，格构式高支墩挠度受环境温度影响比较明显，其将直接影响初始棉花杆单元的长度。在升温30℃与降温25℃的情况下，格构式超高支墩分别上升35 mm和下降32 mm，则在计算时应将棉花杆单元分别缩短35 mm和增长32 mm。计算时通过调整棉花杆单元的弹性模量，改变棉花杆单元的刚度，保证钢桁梁桥下弦悬臂节点竖向位移始终与钢桁梁桥刚架设至格构式超高支墩上方时的竖向位移相同。运用有限元软件中的APDL语言将棉花杆单元进行二次反馈调节，对格构式超高支墩升温 and 降温工况进行力学分析。把棉花杆单元的竖直长度压缩至0，可将钢桁梁桥的荷载传递至格构式超高支墩，将二者合为一个力学整体模型，计算在钢桁梁悬臂架设阶段的格构式高支墩支反力和结构的全过程应力响应。钢桁梁与格构式高支墩接触力学分析模型参见图2。

直到钢桁梁最大悬臂架设5个节间（钢桁梁桥上主墩前夕），格构式超高支墩将承受最大的荷载，该工况为墩梁系统受力的最不利工况。在施工过程中，应尽量避免产生墩梁脱空现象。墩梁脱空时，格构式超高支墩标高与钢桁梁桥梁底的间距大于0，此时格构式超高支墩不起作用。格构式高支墩与钢桁梁系统力学模型见图4。

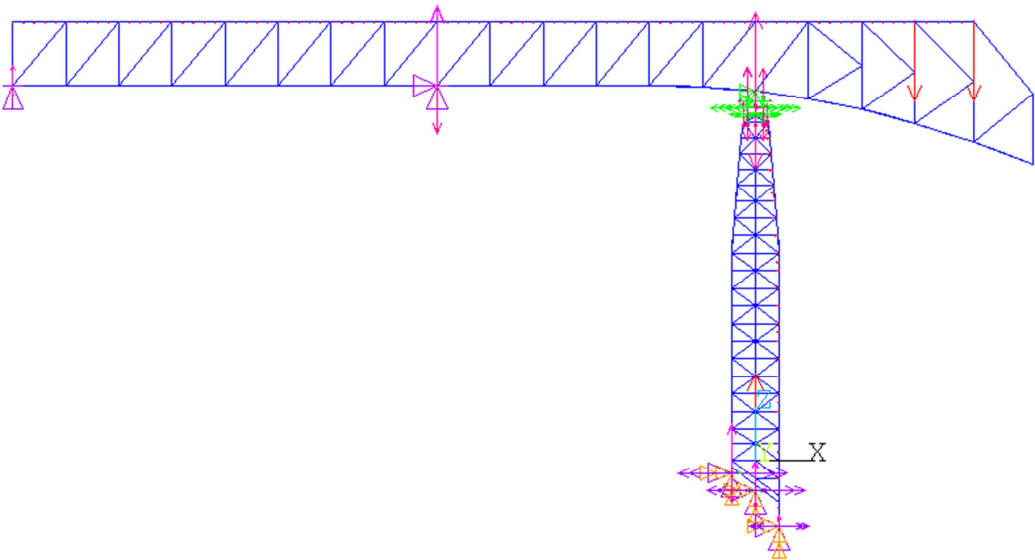


图4 格构式高支墩与钢桁梁系统力学模型。

基于有限元法软件中的APDL语言，采用棉花杆单元模型进行迭代试算、反馈调节，成功解决了墩梁之间的非线性接触问题，其中棉花杆单元的轴力即为格构式高支墩

对钢桁梁的反力。在钢桁梁架设过程中，格构式高支墩支反力随悬臂架设长度的变化曲线如图5所示。

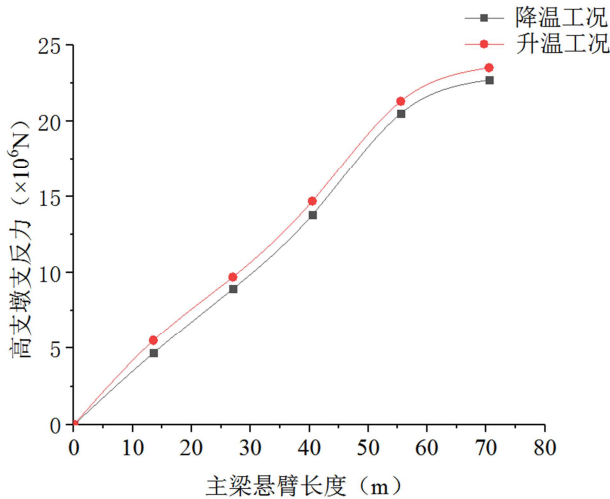


图5 超高支墩支反力随悬臂架设长度的变化曲线。

由图5可知：随着钢桁梁桥不断向前悬臂架设，格构式高支墩支反力逐渐增大，在钢桁梁桥上主墩前夕达到最大值23 500 kN。在相同的架设条件下，升温工况格构式高支墩支反力大于降温工况，但随着悬臂架设长度的不断增加，格构式超高支墩支反力受温度变化的影响却不断被削弱。

在工程实际中，钢桁梁桥刚到达格构式超高支墩上方时，钢桁梁结构自由下挠，末端高于格构式超高支墩墩顶，此时墩顶与主梁下弦杆接触但格构式超高支墩不起顶钢桁梁桥，即二者仅仅在几何面上贴合，而格构式超高支墩不承受钢桁梁桥施加的荷载。

4.2. 墩梁系统格构式超高支墩应力场分析

本文桥梁施工中一侧的格构式支墩高达110.9 m，属于超高支墩，且位于山高坡陡沟深的V字形河谷地带，会受到较为强劲的风荷载作用。对墩梁系统格构式超高支墩应力场分析时，不仅要考虑当地的温度变化，还要考虑风荷载作用。采用有限元法分析墩梁系统，得到格构式超高支墩应力场分布规律，其最大Von Mises应力随悬臂架设长度的变化曲线如图6所示。

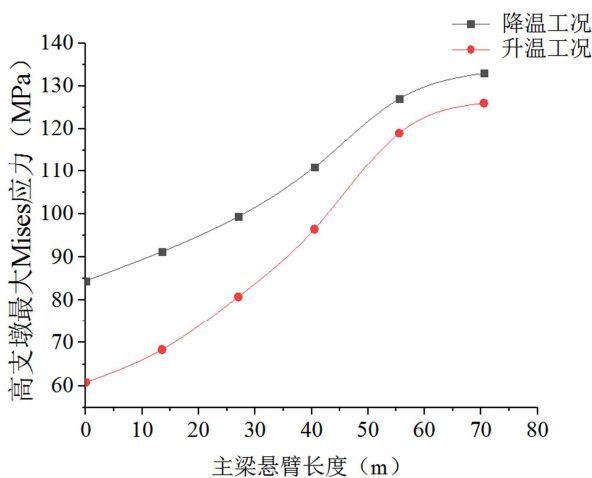


图6 最大Von Mises应力随悬臂架设长度的变化曲线。

由图6可知，随着钢桁梁桥不断向前悬臂架设，格构式超高支墩的最大Von Mises应力逐渐增加。升温工况下，最大Von Mises应力从墩梁刚几何接触时的60.8 MPa增加到钢桁梁桥架设至主墩前夕的126 MPa；降温工况下则由84.5 MPa增加至133 MPa。2种工况下格构式超高支墩的最大Von Mises应力均发生在格构式超高支墩的钢立柱底部。另外，降温工况格构式超高支墩的最大Von Mises应力略大于升温工况，但随着悬臂架设长度的不断增加，温度变化对格构式超高支墩应力的影响不断减弱，这与上节中格构式高支墩支反力的分析结论相符。

5. 结论

针对墩梁系统接触问题，“棉花杆单元”模型理论准确有效，运算迭代次数少，计算该类型接触问题时能够节省大量时间，可为格构式高支墩抄垫施工计算提供简便的分析方法。

对格构式超高支墩与钢桁梁协同工作计算分析时，应充分考虑环境温度的影响。随着钢桁梁悬臂架设长度的不断增加，温度变化对格构式超高支墩支反力和最大应力的影响不断减弱。

降温工况格构式超高支墩的支反力比升温工况低。因此，对于悬臂施工的钢桁梁桥应最好控制在环境温度相对较低的夜间采取上墩工序，可以有效地避免墩梁产生脱空现象，提高墩梁系统的稳定性和安全度。

参考文献

- [1] 闫龙彪, 程泽农, 韩冰, 等. 我国高速铁路桥梁的研究现状与发展趋势 [J]. 铁道建筑, 2018, 58 (12): 6-10.
- [2] YAN B, DAI G L, HU N. Recent Development of Design and Construction of Short Span High-Speed Railway Bridges in China [J]. Engineering Structures, 2015, 37 (7): 707-717.
- [3] Lin Yichang, Xie Xizhe, Yan Ligan, Zhou Yifan. Research on the collapse of Tacoma narrows bridge under the finite element application ANSYS of computational mechanics [J]. Journal of Physics: Conference Series Volume, 2022, 2230 (1): 105-108.
- [4] WANG W F, LIN J F, MA W T. Effect of Location of Temporary Pier in Incremental Launching Construction on Manufacture Error of Girder [J]. Journal of South China University of Technology, 2006, 34 (9): 75-76.
- [5] M. Domaneschi, C. Pellicchia, E. De Iuliis et al. Collapse analysis of the Polcevera viaduct by the applied element method [J]. Engineering Structures, 2020, 214 (C).
- [6] Cao Ran, Agrawal Anil Kumar, El-Tawil Sherif et al. Overheight impact on bridges: A computational case study of the Skagit River bridge collapse [J]. Engineering Structures, 2021, 237.
- [7] Weibing Peng, Zhiwen Tang, Dongze Wang et al. A forensic investigation of the Xiaoshan ramp bridge collapse [J]. Engineering Structures, 2020, 224.

- [8] Nan Hu, Gong-Lian Dai, Bin Yan, Ke Liu. Recent development of design and construction of medium and long span high-speed railway bridges in China [J]. Engineering Structures, 2014, 46 (6): 36-39.
- [9] H. Zhou, K. Liu, G. Shi, Y. Q. Wang, Y. J. Shi, G. De Roeck. Fatigue assessment of a composite railway bridge for high speed trains Part I: Modeling and fatigue critical details [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 62 (8): 65-67.
- [10] 张壮, 牛忠荣, 吴健安, 等. 铁路大跨度钢-混凝土组合梁桥转体施工力学分析 [J]. 铁道建筑, 2018, 58 (11): 51-54.
- [11] 陈仕刚, 吴先树. 超高墩大跨连续刚构主墩形式研究及关键技术 [J]. 公路, 2012, 25 (5): 104-108.
- [12] 李文杰, 牙马忠, 李兆峰, 等. 96m简支钢桁梁转体横移施工过程分析及监控 [J]. 钢结构, 2018, 33 (4): 105-109, 115.
- [13] 吉伯海, 杨明. 刚节点钢连接梁循环静载试验 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (11): 14-16.
- [14] 雷素敏. 偏载下支座脱空对多跨连续梁受力性能的影响 [J]. 铁道建筑, 2018, 58 (12): 42-45.
- [15] 王娣, 梅秀道. 顶推施工算法及临时墩支座标高调整优化 [J]. 世界桥梁, 2010, 37 (3): 70-73.