

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.10.011

悬吊支架法施工钢混组合梁的力学行为研究

管弦¹, 唐国华²

(1. 北京华宏工程咨询有限公司, 北京 101101; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 通过三维有限元模型采用悬吊支架法进行了钢混组合梁施工过程的仿真模拟, 分析了悬吊支架自重、风荷载、悬吊点纵向间距、混凝土桥面板厚度、桥面混凝土浇筑过程及悬吊支架拆除等多因素对钢主梁及其组合梁力学性能的影响, 揭示了钢混组合梁在悬吊支架法施工过程中的力学行为。结果表明: 钢主梁的正应力和位移均随着悬吊支架的重量增加而增加且对增幅影响都相对较大; 施工过程中的风荷载会对钢主梁产生较大的横向位移, 应在荷载组合分析中考虑横风荷载且采取必要措施来限制桥面板浇筑过程中钢主梁的横向位移; 钢主梁的位移和应力会随着悬吊点的纵向距离的变化而呈现出抛物线形变化, 故悬吊点纵向距离的最佳取值推荐为 4 m; 钢主梁的跨中最大位移和应力值随着桥面板板厚的增大而增大, 且桥面板的质量在整个系统受力中占据了主要的地位; 悬吊支架法浇筑桥面板过程中钢主梁的应力和变形都随着桥面板混凝土施工阶段的进行而增加, 为确保桥梁的各阶段线形和理论相符, 应在施工过程中根据在每个浇筑阶段施工后引起的钢主梁竖向位移变形对各个截面的设计标高进行预抬高。另外, 钢混组合梁预拱度设置时必须充分考虑由于悬吊支架拆除而引起的钢主梁向上回弹因素。

关键词: 桥梁工程; 悬吊支架; 钢混组合梁; 力学行为; 有限元分析

中图分类号: U445.46

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 10-0084-07

Study on Mechanical Behavior of Steel-concrete Composite Girders Constructed by Suspension Bracing Method

GUAN Xuan¹, TANG Guo-hua²

(1. Beijing Huahong Engineering Consultants Co., Ltd., Beijing 101101, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The construction process of steel-concrete composite girders is simulated by using 3D finite element model and suspension bracing method. The influences of multiple factors such as self-weight of suspension bracket, wind load, longitudinal spacing of suspension points, concrete deck slab thickness, concrete casting process and suspension bracket removal on the mechanical properties of the main steel girder and the composite girder are analyzed. The mechanical behavior of the steel-concrete composite girders during the construction process by suspension bracing method is revealed. The result shows that (1) The normal stress and displacement of the steel girder increase with the increase of the weight of the suspension bracket and they have relatively large impact on the increase. (2) The wind load during construction process will produce large transverse displacement of the main steel girder, the transverse wind load should be considered in the load combination analysis and necessary measures should be taken to limit the transverse displacement of the main steel girder during the deck casting process. (3) The displacement and stress of the main steel girder will show a parabolic change with the change of the longitudinal spacing of the suspension points, so the optimal value of the longitudinal spacing of the suspension points is recommended to be 4 m. (4) The maximum mid-span displacement and stress of the main steel girder increase with the increase of the deck slab

收稿日期: 2022-04-18

作者简介: 管弦 (1972-), 男, 广西岑溪人, 高级工程师. (28740820@qq.com)

thickness, and the weight of the deck slab occupies the main position in the whole system force. (5) In the process of casting deck slabs with the suspension bracing method, the stress and deformation of the main steel girder increase with the concrete construction stage of the deck slabs. In order to ensure that the geometric shape of the bridge at each stage is consistent with the theory result, the design elevation of each section should be pre-raised during the construction process according to the vertical displacement and deformation of the main steel girder caused by the construction of each casting stage. In addition, the upward rebound of the main steel girder caused by the removal of the suspension bracket must be fully considered when setting the pre-arch of the steel-concrete composite girder.

Key words: bridge engineering; suspension bracket; steel-concrete composite girder; mechanical behavior; FE analysis

0 引言

工字钢-混组合结构是由外露的工字型钢主梁作为主要的承重结构与混凝土桥面板间通过剪力键连接形成的一种组合结构。这一组合结构由于兼具钢梁和钢筋混凝土梁的优点而广泛应用于梁式桥^[1]。国内外学者针对工字钢混组合梁的研究主要集中在抗剪连接件力学性能研究和钢混组合梁的力学行为研究^[2-3], 在施工方法方面的研究较少且主要集中在落地支架方面^[4-8], 是缺少新型施工方法的研究^[9]。在研究方法方面则广泛采用了三维有限元分析方法, 有的采用了实体模型^[10-13], 但大多采用了杆系模型进行了分析^[14-16]。

悬吊支架法是直接利用钢-混组合梁中钢结构梁的自承能力, 在钢结构梁下悬挂支架体系来完成这种组合结构中的混凝土构件的现浇施工。这种施工方法的支架不受地形、河流、地基承载力的限制, 且经济性高, 占用桥下空间少, 是一种经济有效的施工方法^[17]。然而悬吊支架这种支架类型在实际工程中却很少使用。王国炜等^[18]采用悬吊模板支架法成功完成了上珠线漕溪路桥中跨 128 m 主纵梁的现浇施工。刘宝新等^[19]在京哈直通线财落大桥采用门式框架墩连续梁悬吊式支撑体系进行了施工。姚宏生等^[20]对梁悬吊式支撑体系在京哈直通线财落大桥中的应用, 从施工技术方面进行了深入研究。

悬吊支架法虽然具有不受现场环境限制, 可提高施工速度、节约施工成本且可以大大降低对桥下已有线路影响的诸多优点, 但由于悬吊支架固定点较少, 在风荷载等敏感性因素影响下支架体系的横向位移控制较为困难。同时, 在混凝土桥面板浇注过程中, 随着混凝土质量的增加及浇注点纵横向位置的变化, 悬吊支架系统也将发生变形, 导致浇注的混凝土结构随之发生变形。为了使悬吊支架浇注

的混凝土桥面板成型后其线形能满足设计要求, 有必要对这种悬吊支架对钢结构及支架本身在施工过程中的力学行为进行研究。

1 工程概况

1.1 工程背景

广东某大桥的桥位地处低缓丘陵, 跨越丘陵间谷地, 沿丘陵坡脚展布, 地势起伏较大。大桥主梁采用的是双工字钢板组合梁, 分左右两幅, 桥跨组合为 4×40 m+4×40 m+3×40 m+4×40 m, 共 15 跨。单幅组合梁桥面宽为 12.5 m, 左右幅中间设置 50 cm 宽分隔带, 双幅全宽 25.5 m, 上部结构梁高均为 2.7 m (其中钢板梁高 2.2 m, 桥面板 0.4 m, 铺装层 0.1 m)。

1.2 悬吊支架构造

该大桥现浇桥面板采用悬吊支架方案, 即利用钢梁自承重能力, 在钢板梁底板下悬挂横向主承重梁, 而后以此为基础安装满堂碗扣支架, 铺设方木及竹胶板, 实现整联现浇。悬吊支架设计图如图 1 所示。

精轧螺纹钢吊杆组成。其中上下横梁均间距 4 m 布置一道, 主纵梁根据受力特性间距先按 30, 60, 90, 120 cm 布置。在横断面上布置 6 根精轧螺纹钢吊杆, 两侧对称布置。碗扣支架立杆横向间距根据不同部位受力情况分为 30, 60, 90, 120 cm 4 种布置, 纵向统一按 90 cm 间距布置。根据碗扣支架的搭设施工规范, 设置纵横向的剪刀撑。底模系统由 15 mm 厚的竹胶板面板、10 cm×10 cm 的截面的方木纵桥向方木、横桥向 $\phi 48 \times 3.5$ mm 小钢管组成。

悬吊支架各材料的参数如表 1 所示。

2 悬吊支架结构对钢主梁结构力学行为影响研究

2.1 悬吊支架结构计算模型

应用有限元软件 Midas Civil 建立了该支架系统

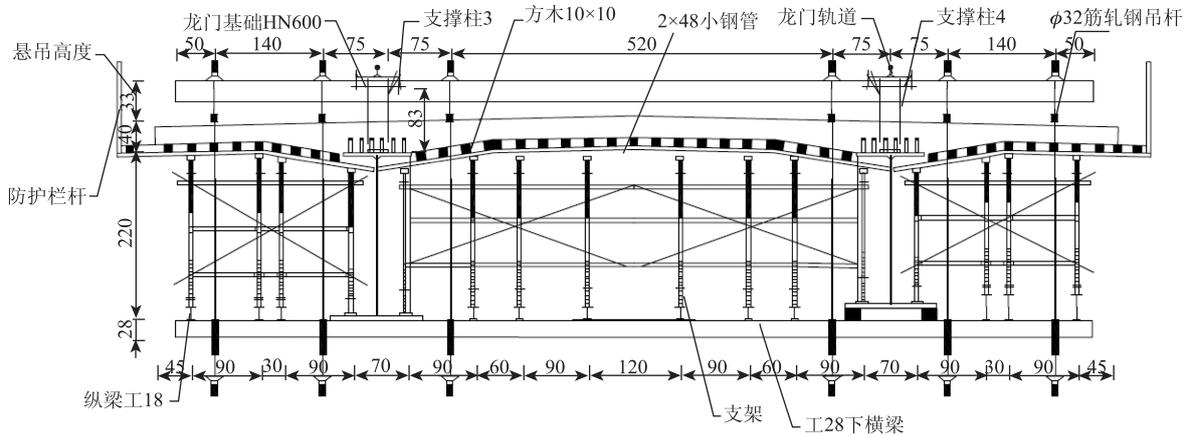


图1 悬吊支架跨中标准断面 (单位: cm)

Fig. 1 Standard cross-section of mid-span of suspension bracket (unit: cm)

表1 悬吊支架材料参数

Tab. 1 Material parameters of suspension bracket

材料	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa
桥面板混凝土 C50	26	3.45×10^4
模板木材	8	1.0×10^4
钢管材料及纵横梁 Q235	76.98	2.06×10^5
精轧螺纹钢吊杆和钢主梁 Q345	78.5	2.06×10^5

的计算模型。边界条件设置为钢主梁的两端下横梁放在盖梁上, 两端下横梁中间约束 DZ, 两端下横梁按照简支梁添加约束, 上横梁与钢主梁之间只考虑只受压弹性连接, 上下横梁通过吊杆连接, 吊杆采用桁架单元模拟不传递弯矩。悬吊支架模型建模共计 14 500 个节点, 18 399 个梁单元, 72 个桁架单元。悬吊支架有限元计算模型如图 2、图 3 所示。

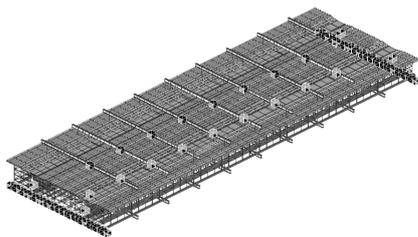


图2 悬吊支架整体有限元模型

Fig. 2 Overall finite element model of suspension bracket

2.2 悬吊支架的质量对钢主梁的力学行为影响

通过对悬吊支架的质量进行调整来研究悬吊支架质量对钢主梁的力学行为的影响。采用控制变量的方法, 设定悬吊支架的质量为唯一变量, 风荷载、悬吊点的纵向距离及桥面板板厚等影响因素不变。在荷载 Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 和 W_k 共同作用的情况下, 将悬吊支架的质量转化为自重的形式, 再通过改变材料的重度来实现改变悬吊支架的质量。悬吊支架

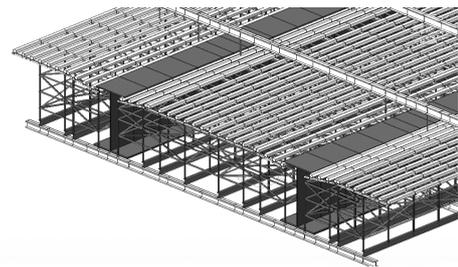


图3 悬吊支架整体有限元模型 (端部放大)

Fig. 3 Overall finite element model of suspension bracket (end enlargement)

内部各个构件的重度增幅按照原来悬吊支架自重时各个构件所占的百分比来进行重度增加的比例分配。选取悬吊支架的重度控制范围为 1.0 倍、1.5 倍和 2.0 倍自重 3 个样本来计算钢主梁的应力及位移。

(1) 应力计算

应力计算结果如表 2 和图 4 所示。

表2 悬吊支架不同质量下钢主梁跨中应力值 (单位: MPa)

悬吊支架的质量	最大压应力值/MPa
1.0 倍自重	-172.90
1.5 倍自重	-180.11
2.0 倍自重	-187.22

由表 2 和图 4 数据分析可知, 钢主梁在 1.0 倍自重、1.5 倍自重和 2.0 倍自重时的最大压应力发生在钢主梁的 $L/2$ 位置, 当悬吊支架为原自重时 (即 1.0 倍自重) 的压应力为 172.90 MPa, 相对于 Q345 的钢材允许应力来说仍有较大的储备空间, 而且钢主梁的梁端部分大多处于低应力状态, 有较大的安全储备空间。同时可以看出钢主梁的最大压应力值随

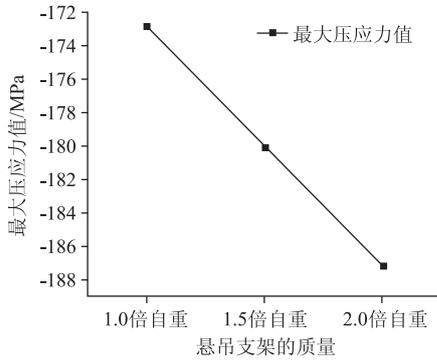


图 4 悬吊支架不同质量下跨中应力变化

Fig. 4 Stress at mid-span varying with weight of suspension bracket

着悬吊支架的质量增加而增加, 且正应力值大致呈线性增长。当悬吊架的质量为 1.5 倍自重时, 压应力为 180.11 MPa, 比 1.0 倍自重时的压应力增大了 6.21 MPa, 增加了 3.59%; 当悬吊支架的质量为 2.0 倍自重时, 压应力为 187.22 MPa, 比 1.0 倍自重时的压应力增了 12.32 MPa, 增加了 7.13%。由此可见, 悬吊支架质量的改变对于钢主梁应力影响较大, 同时也说明悬吊支架的质量在整个桥面板浇注过程中结构应力中所占比重较小。

(2) 位移计算

位移计算结果如表 3 和图 5 所示。

表 3 悬吊支架不同质量下钢主梁的跨中位移值 (单位: mm)

Tab. 3 Displacement values at mid-span of main steel girder with different weights of suspension bracket (unit: mm)

悬吊支架的质量	z 向变形
1.0 倍自重	66.48
1.5 倍自重	70.38
2.0 倍自重	74.26

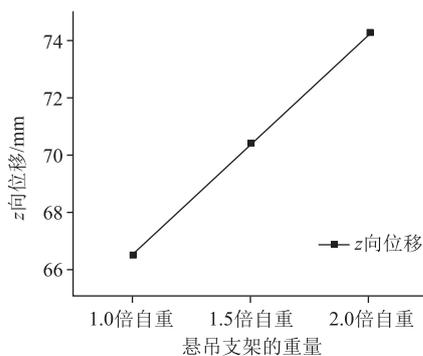


图 5 悬吊支架不同质量下跨中位移变化

Fig. 5 Stress at mid-span varying with weight of suspension bracket

由表 3 和图 5 数据分析可知, 钢主梁的最大 z 向位移随着悬吊支架质量的增加而呈线性增长, 且钢

主梁在 1.0 倍自重、1.5 倍自重和 2.0 倍自重时的最大 z 向位移均发生在钢主梁的 L/2 位置。当悬吊支架的质量为原支架的 1.5 倍自重时, 钢主梁在 z 向的最大位移比 1.0 倍自重时位移值增加了 3.9 mm, 增加了 5.87%; 当悬吊支架的质量为原支架的 2.0 倍自重时, 钢主梁在 z 向的最大位移比 1.0 倍自重时位移值增加了 7.78 mm, 增加了 11.70%。由此可见, 悬吊支架质量的变化对钢主梁的跨中位移的影响较大。

在对钢主梁结构成型前线形控制时, 应根据悬吊支架自重与钢主梁之间变形规律对钢主梁的预拱度进行预抬。跨中预拱度在 1.5 倍自重时要比 1.0 倍自重时向上多预抬 3.9 mm, 2.0 倍自重时要比 1.0 倍自重时向上多预抬 7.78 mm。其余截面位置预拱度的设置均按照在各自悬吊支架质量作用下对应引起的变形值进行调整, 这样才能使钢主梁成桥后的实际线形与理论线形保持一致。

2.3 风荷载对钢主梁的力学行为影响

根据《建筑结构荷载规范》的规定, 广东省的基本风压值可按照《建筑结构荷载规范》附录 E 中的表 5 重现期 (R) 为 50 a 的值采用。查该规范可以得出广东地区的基本风压为 0.35 kN/m²。根据桥梁所处的区域, 查该规范可以得出当地的基本风压为 0.35 kN/m²。基本风压由公式 $\omega_k = \beta \mu_s \mu_z \omega_0$ 计算得当地的风荷载标准值为 $\omega_k = 0.75 \text{ kN/m}^2$, 方向考虑为水平; 将风荷载标准值转化为节点荷载, 再将风荷载通过节点荷载的形式施加到悬吊支架和钢主梁的横向迎风面上。

支架的横向位移都是发生在钢主梁的 L/2 处。在当悬吊支架和钢主梁考虑作用风荷载时, 比没有风荷载时的横向位移大了 18.46 mm, 横向最大位移达到了 21.20 mm。钢主梁跨中应力值增加了 10.05 MPa, 增加幅度为 26.17%。这说明风荷载对于钢主梁的应力与变形影响较大。

2.4 悬吊支架的悬吊点纵向距离对钢主梁的力学行为影响

通过对悬吊支架的悬吊点纵向距离进行调整来研究悬吊支架的悬吊点纵向距离对钢主梁的力学行为的影响, 纵桥向间距分别采用 2, 3.5, 4, 5, 6 m 布置来探讨吊支架的悬吊点纵向距离对钢主梁的力学行为的影响情况。

通过应力和位移汇总对比图 6、图 7 看出, 钢主梁的跨中最大位移和应力随着悬吊点的纵向距离的变化而大致表现出抛物线变化, 其中悬吊点纵向距离在 2~4 m 之间时, 最大压应力值和最大竖向位移

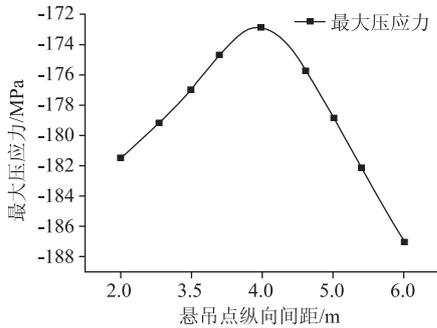


图6 钢主梁应力与悬吊点纵向距离关系

Fig. 6 Relationship between stress and longitudinal spacing of suspension points of main steel girder

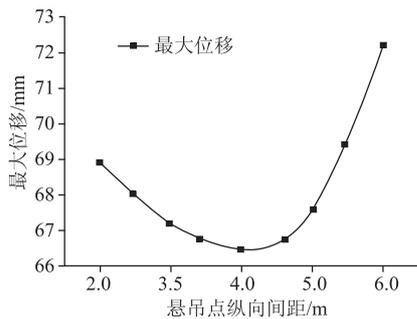


图7 钢主梁跨中位移与悬吊点纵向距离关系

Fig. 7 Relationship between displacement at mid-span and longitudinal spacing of suspension points of main steel girder

逐渐减小；在4~6 m之间时，最大压应力值和最大竖向位移逐渐增大。实际工程悬吊点纵向间距设计合理值为4 m，处于抛物线的极值点附近，有利于提高钢主梁的受力。

2.5 混凝土桥面板板厚对钢主梁结构力学行为影响

通过对桥面板的板厚进行调整来研究混凝土桥面板的板厚对钢主梁的力学行为的影响。具体研究了桥面板厚度为10, 20, 30 cm时钢主梁的力学行为，计算结果如表4所示。

表4 混凝土板厚度对钢主梁跨中应力和位移的影响

Tab. 4 Influence of concrete slab thickness on stress and displacement at mid-span of main steel girder

混凝土板厚度/cm	最大压应力/MPa	最大位移/mm
板厚 10	-110.55	48.04
板厚 20	-172.90	66.48
板厚 30	-232.28	88.90

由表4数据分析可知，随着桥面板厚度的增加，钢主梁的应力和位移都在增加。当桥面板板厚为20 cm时，钢主梁的压应力为172.90 MPa；当桥面板板厚为30 cm时，钢主梁的压应力为232.28 MPa，增加了59.29 MPa，增加比例为34.29%；而位移为

由66.48 mm增加到88.90 mm，增加了33.72%。由此可以看出，桥面板的质量在整个系统的受力中占据了主要的地位。

2.6 浇注桥面板混凝土过程中对钢主梁的力学行为影响

浇注混凝土桥面板的浇注顺序，即浇注桥面板采用在横桥向浇注时按照先中间再两边的浇注顺序一次浇注到位，纵桥向由跨中向梁端逐步浇注到位的方式进行。依据浇注顺序，共分4个工况：工况1为悬吊支架安装成功状态（临时施工荷载也加载在了悬吊支架上）；工况2为跨中段混凝土浇注完成；工况3为三分段混凝土浇注完成；工况4为梁端段混凝土浇注完成。

通过图8可以看出由于钢主梁在工况4作用下所受到的梁部荷载最大，所以应力也最大，最大应力为172.99 MPa。通过图9可以看出由于钢主梁在工况4作用下所受到的梁部荷载最大，故竖向位移也最大，最大位移为66.48 mm。这些数据为钢主梁的安全，以及钢主梁的预拱度的设置提供了依据。

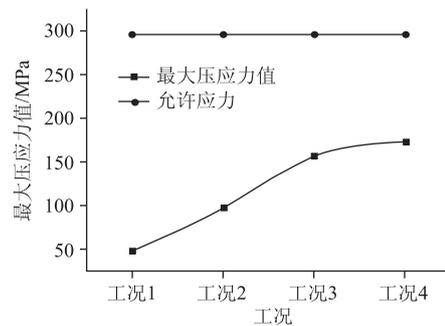


图8 钢主梁跨中应力变化

Fig. 8 Stress variation at mid-span of main steel girder

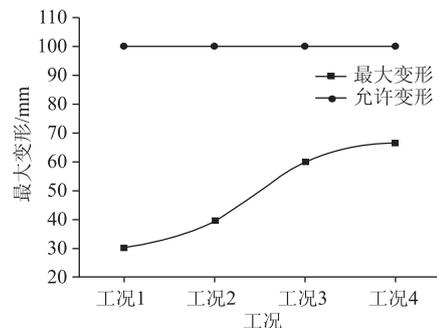


图9 竖向跨中位移变化

Fig. 9 Displacement variation at mid-span of main steel girder

2.7 悬吊支架结构的拆除对钢主梁结构力学行为影响

当混凝土桥面板结构强度达到设计要求时即可对悬吊支架进行拆除。当桥面板混凝土达到设计强度后，就认为钢主梁和混凝土板已经成为一体，可以作为一个整体共同受力，则此时就只承受悬吊支

架的自重和风荷载作用, 不再承受混凝土的振捣荷载和施工荷载。对悬吊支架在拆除前后钢主梁的位移变化进行分析。

根据表 5 和图 10 数据分析可知, 支架在拆除前后, 跨中位置拆除前比拆除后的竖向位移增大了 10.13 mm, 而钢主梁在只受桥面板混凝土质量和风荷载的情况下跨中的最大竖向位移为 45.84 mm, 相对于拆除后的位移减少了 10.18 mm。由此可见, 在桥面板和钢主梁形成一个整体后, 由于桥梁的刚度变大, 会造成一部分位移是不可恢复的, 而对于可恢复的这一部分位移是可以通过一些技术方法来避免。

表 5 在不同工况下时钢主梁的竖向位移 (单位: mm)

Tab. 5 Vertical displacement of main steel girder under different working conditions (unit: mm)

工况	梁端	$\frac{1}{4} L/\text{mm}$	跨中/mm
拆除前	0	-47.01	-66.15
拆除后	0	-39.81	-56.02

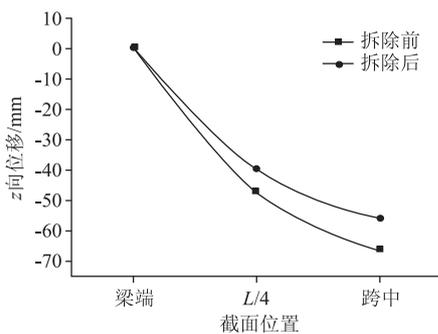


图 10 悬吊支架拆除前后不同截面的竖向位移

Fig. 10 Vertical displacements of different sections before and after removal of suspension bracket

3 结论

本研究应用三维有限元模型对钢混组合梁悬吊支架法的施工过程进行了仿真模拟, 分析了悬吊支架自重、风荷载、悬吊点纵向间距、混凝土桥面板厚度、混凝土浇筑过程和悬吊支架拆除对钢主梁力学行为的影响, 揭示了悬吊支架与钢主梁之间的变形规律。本研究的主要结论:

(1) 钢主梁的正应力随着悬吊支架的质量增加而增加, 位移也随着悬吊支架的质量增加而增加, 且应力和位移的增幅影响都相对较大。

(2) 悬吊支架的风荷载对钢主梁的位移和应力影响较大, 会产生较大的横向位移。故应在荷载组合分析中考虑横风荷载且采取必要措施来限制在浇筑桥面板的过程中钢主梁的横向位移。

(3) 钢主梁的位移和应力随着悬吊支架悬吊点纵向距离的变化而表现出抛物线变化, 其中悬吊点纵向距离在 2~4 m 之间时, 最大压应力值和最大竖向位移逐渐减小; 在 4~6 m 之间时, 最大压应力值和最大竖向位移逐渐增大。因此, 悬吊点纵向间距合理取值建议为 4 m。

(4) 钢主梁跨中最大位移和应力随着桥面板板厚的增大而增大, 且桥面板的质量在整个系统中受力占据了主要的地位。

(5) 利用悬吊支架浇筑桥面板过程中, 钢主梁的应力和位移都随着桥面板混凝土的浇筑而增加。在施工过程中可以根据每个浇筑阶段施工后引起的钢主梁竖向位移对各个截面标高进行预抬, 以确保桥梁的各阶段线形和理论线形尽可能保持一致, 同时也可防止误差的积累导致最终线形的偏离。

(6) 悬吊支架拆除过程中, 钢主梁的应力和变形都随着支架的拆除有所变化且变化较大, 在施工前应该通过考虑拆除悬吊支架后恢复的变形和钢主梁与桥面板形成整体后的不可恢复变形来进行钢主梁预抬或设置预拱度, 以确保桥梁在成桥后的实际线形和理论线形相符。

本研究成果对于完善悬吊支架法在钢混组合梁结构施工的理论体系提供一定的参考依据, 同时也可以为类似结构设计、施工提供了理论指导。

参考文献:

References:

- [1] 郑大伟, 刘宇. 钢-混组合梁在工程中的应用研究 [J]. 工程与建设, 2022, 36 (1): 128-129.
ZHENG Da-wei, LIU Yu. Study on Application of Steel-concrete Composite Beam in Engineering [J]. Engineering and Construction, 2022, 36 (1): 128-129.
- [2] 卫星, 肖林, 温宗意, 等. 钢-混组合结构桥梁 2020 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43 (增 1): 107-119.
WEI Xing, XIAO Lin, WEN Zong-yi, et al. State-of-the-art Review of Steel-concrete Composite Bridges in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43 (S1): 107-119.
- [3] 张静. 工字钢-混凝土组合梁研究综述 [J]. 市政技术, 2014, 32 (1): 130-133, 141.
ZHANG Jing. Research Review of I-steel and Concrete Composite Beams [J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32 (1): 130-133, 141.
- [4] 郭培文, 盖希才, 都兴龙. 工字钢-混凝土组合结构梁施工技术要点探讨 [C] // 钢结构与绿色建筑技术应用. 北京: [出版者不详], 2019: 311-317.

- GUO Pei-wen, GAI Xi-cai, DU Xing-long. Steel Structures and Application of Green Technology in Buildings [C] // Steel Structure and Green Building Technology Application. Beijing: [s. n.], 2019: 311-317.
- [5] 张建. 京秦高速跨潮白河特大桥钢混组合梁临时支架施工技术 [J]. 建筑技术, 2019, 50 (2): 165-168. ZHANG Jian. Construction Technology of Temporary Bracket for Steel Concrete Composite Beam of Beijing-Qinhuangdao High Speed Trans-Chaobai River Large Bridge [J]. Architecture Technology, 2019, 50 (2): 165-168.
- [6] 张鹏飞. 工字钢-混凝土组合连续梁施工监测及分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019. ZHANG Peng-fei. Construction Monitoring and Analysis of I-beam-concrete Combination Continuous Beam [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [7] 武智飞, 张文强, 孙文铎. 工字钢-混凝土组合梁施工质量控制技术 [J]. 公路, 2020, 65 (6): 65-69. WU Zhi-fei, ZHANG Wen-qiang, SUN Wen-duo. Quality Control Technology of I-beam-concrete Combination Beam Construction [J]. Highway, 2020, 65 (6): 65-69.
- [8] 潘本金, 任万鹏. 钢混组合箱梁及桥面板整体现浇施工关键技术 [J]. 施工技术, 2022, 51 (12): 42-45, 54. PAN Ben-jin, REN Wan-peng. Key Technology of Integral Cast-in-situ Construction of Steel-concrete Composite Box Girder and Bridge Deck [J]. Construction Technology, 2022, 51 (12): 42-45, 54.
- [9] 刘雪峰, 李东. 新型钢-混凝土组合梁桥面板设计与施工技术研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2021 (10): 91-94. LIU Xue-feng, LI Dong. Research on Design and Construction Technology of New Type Steel-concrete Composite Girder Bridge Slab [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021 (10): 91-94.
- [10] 张万里. 钢混组合连续刚构桥混凝土桥面板安装 [J]. 公路, 2019, 64 (10): 152-156. ZHANG Wan-li. Installation of Concrete Deck Slabs for Steel-cement Combination Continuous Rigid Bridge [J]. Highway, 2019, 64 (10): 152-156.
- [11] 王胜斌, 吴肖波, 唐国喜, 等. 双工字钢-混凝土板组合梁桥车桥耦合振动研究 [J]. 世界桥梁, 2019, 47 (3): 38-43. WANG Sheng-bin, WU Xiao-bo, TANG Guo-xi, et al. Study of Vehicle-bridge Coupled Vibration in Composite Girder Formed of Double I Steel Girders and Concrete Slabs [J]. World Bridges, 2019, 47 (3): 38-43.
- [12] 张浩. 工字钢混组合结构混凝土模板有限元分析 [J]. 交通世界, 2020 (3): 56-58. ZHANG Hao. Finite Element Analysis of Concrete Formwork for I-beam Steel-concrete Combination Structure [J]. Transpo World, 2020 (3): 56-58.
- [13] 李杨, 任沛琪, 丁井臻, 等. 混凝土双面组合作用梁基本力学性能试验研究与数值模拟 [J]. 工程力学, 2020, 37 (5): 82-93. LI Yang, REN Pei-qi, DING Jing-zhen, et al. Experimental Study and Numerical Simulation of Mechanical Properties of Double Composite Steel-concrete Beams [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37 (5): 82-93.
- [14] 彭刚. 工字型钢-混凝土连续组合梁受弯性能分析及负弯矩区承载力计算 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013. PENG Gang. Analysis of Bending Performance of I-beam-concrete Continuous Composite Beams and Calculation of Bearing Capacity in Negative Moment Zone [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [15] 聂建国, 朱力, 攀健生, 等. 钢-混凝土组合箱梁桥杆系模型的理论与计算 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (7): 32-44. NIE Jian-guo, ZHU Li, PAN Jian-sheng, et al. Theory and Calculation of Beam-truss Model of Steel-concrete Composite Box-girder Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (7): 32-44.
- [16] 陈伏立. 预制装配式钢-混组合梁有限元计算模型分析 [J]. 山西建筑, 2022, 48 (4): 141-143. CHEN Fu-li. Finite Element Calculation Model Analysis of Prefabricated Steel-concrete Composite Girder [J]. Shanxi Construction, 2022, 48 (4): 141-143.
- [17] 魏光华. 钢-混凝土组合梁桥设计与施工探讨 [J]. 山西建筑, 2007, 33 (24): 338-339. WEI Guang-hua. Discussion on the Design and Construction of Steel-concrete Combined Girder Bridges [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33 (24): 338-339.
- [18] 王国炜, 王合希. 采用悬吊模板支架法现浇施工净空受限制的跨线桥 [J]. 铁道建筑技术, 2000, 78 (5): 24-26. WANG Guo-wei, WANG He-xi. Cast-in-place Construction of Span Bridges with Restricted Headroom Using Suspended Formwork Support Method [J]. Railway Construction Technology, 2000, 78 (5): 24-26.
- [19] 刘宝新, 王军. 高架框架墩连续梁悬吊支架法施工技术 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (增1): 107-111. LIU Bao-xin, WANG Jun. Construction Techniques of Suspension Scaffolding Method for High Frame Pier Continuous Girder of a Bridge [J]. Bridge Construction, 2012, 42 (S1): 107-111.
- [20] 姚宏生, 马秋果, 刘汉斌, 等. 高架框架墩连续梁悬吊支架法的施工技术研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2013, 26 (1): 14-17. YAO Hong-sheng, MA Qiu-guo, LIU Han-bin, et al. Research on Construction Technology of Suspension Stent Method for the Elevated Frame Pier Continuous Beam [J]. Journal of Shijiazhuang Railway University (Natural Science Edition), 2013, 26 (1): 14-17.