

Mechanical Analysis and Reinforcement for Platform Structures at Top of Super High Pier

Huang Yuhuan^{1,*}, Li Xuyang², Qiao Zhongfa¹, Ye Jianlong¹, Zhou Mi¹, Li Guanghao¹

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

²Zhejiang Digital Communication Academy Technology Co., Ltd, Hangzhou, China

Email address:

532669750@qq.com (Huang Yuhuan)

*Corresponding author

To cite this article:

Huang Yuhuan, Li Xuyang, Qiao Zhongfa, Ye Jianlong, Zhou Mi, Li Guanghao. Mechanical Analysis and Reinforcement for Platform Structures at Top of Super High Pier. *Science Discovery*. Vol. 11, No. 2, 2023, pp. 55-60. doi: 10.11648/j.sd.20231102.15

Received: March 17, 2023; **Accepted:** April 18, 2023; **Published:** April 23, 2023

Abstract: A double-track bridge is continuous steel-truss beam structure, which consists of 7 spans. Because there are 151.5m cantilever erection cases in the construction process of the 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 the steel-truss bridge. In order to ensure the safety of construction, the whole mechanical models of the steel-truss bridge together with the super-high pier and bearing beam are established in this paper. In the whole erection process of the steel-truss bridge, the bearing beam connects the steel-truss bridge and the super high pier, which is the main bearing structure. Then, the finite element method (FEM) with three dimensional shell elements and body elements is used to analyse the stress and deformation status of the bearing beam during the construction of the continuous steel-truss girder. Based on the analytical results from FEM, the reinforcement schemes are proposed for the initial design of the bearing beam where the local buckling or insufficient strength will occur under dangerous working cases. The structural reinforcement strategy makes the bearing beam meet the safety requirements under the construction process. The results of the present paper can provide reference for pier top layout and reinforcement analysis of similar super-high piers.

Keywords: Steel Truss Bridge, High Pier, Bearing Beam, Construction, FEM, Reinforcement

超高墩顶部承台结构力学分析及加固

黄煜寰^{1*}, 李煦阳², 乔仲发¹, 叶建龙², 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浙江数智交院科技股份有限公司, 杭州, 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81m处设置高度分别为110.9m和133.5m的超高支墩以缩短钢桁梁桥悬臂架设长度。为确保施工安全, 本文建立了该桥在整个施工过程中钢桁梁桥、超高支墩及顶部分配梁的整体力学模型。在整个钢桁梁桥架设过程中, 分配梁连接钢桁梁桥与超高支墩, 为主要的承力构件。文中采用有限元法三维壳单元和实体单元组合对连续钢桁梁架设施工过程中分配梁结构的应力和变形状态进行分析, 并根据计算结果对最不利工况下分配梁可能发生局部屈曲和强度不足的区域, 提出了加固措施。结构加固后满足在最不利工况下的安全性要求, 本文研究结果可为类似超高支墩的墩顶结构布置以及加固分析提供参考。

关键词：钢桁梁桥，高支墩，分配梁，施工，有限元法，加固

1. 引言

近年来，随着我国铁路运输事业的蓬勃发展，钢桁梁桥也被广泛运用在铁路桥梁建设中。由于大跨度钢桁梁桥在架设过程中普遍存在着较长距离的悬臂架设过程，所以在钢桁梁桥架设过程中一般设立临时墩用以减小钢桁梁桥架设的悬臂长度。而在临时墩与钢桁梁桥之间又通常布置分配梁以用来承受钢桁梁传递下来的荷载。分配梁要承受较大的钢桁梁桥自重并且是集中力作用，因分配梁易于发生局部的应力集中而破坏，并直接影响临时支墩与钢桁梁桥的安全施工，所以临时支墩顶部分配梁通常被视为钢桁梁桥悬臂架设过程中的关键结构。

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的建设，则大跨度钢桁梁桥被广泛运用，而大跨度钢桁梁桥在架设过程中也需要临时设施以用来缩短悬臂架设的长度[1, 2]，所以对于桥梁与临时墩的接触和荷载传递的分配梁的研究就尤为重要[3-8]。对于临时墩及分配梁垫层标高的调整，王俊[9]等人运用了Mccilm仿真优化程序来模拟计算大跨度变曲率顶推过程，为顶推施工过程中临时墩及分配梁垫层标高的调整提供了优化方法。王希岗[10]等人以东营黄大铁路黄河特大桥为工程背景，对滑道梁的设计、计算、安装等各个过程进行了论述，为钢桁梁桥临时辅助结构的设计提供了工程实例。李文杰[11]等人通过对瑞九铁路庐山站下承式简支钢桁梁特大桥的分配梁进行了施工过程分析和监控，并提出分配梁加固结构为该工程的分配梁、临时墩及钢桁梁的刚度和强度提供了保证。罗金辉[12, 13]等人通过对超大截面分配梁进行了轴压承载力试验研究，对分配梁构造参与承载传递进行了深入探究，为分配梁的传力机理与分配梁的设计和加固提供了试验依据。程江敏[14]等人对近年来国内外钢结构加固

方法进行了总结，主要分为改变结构传力体系、增加构件截面面积加固以及连接节点加固的三种方法，其为钢结构设计加固提供了参考。随着大跨度桥梁广泛运用于铁路建设，虽然对分配梁的理论研究取得丰硕的成果，但在超高临时墩结构设计阶段，由于起连接钢桁梁桥与支墩作用的分配梁结构与受力情况较为复杂，而常规的整体设计计算无法获得分配梁结构的局部应力场。因此对超高临时墩的分配梁在设计阶段的结构力学性能评估仍需深入研究。

本文以某新建双线特大桥施工过程中的超高临时墩顶部承力的分配梁结构为研究对象，首先提取出钢桁梁桥悬臂架设的各个工况下的分配梁与超高临时墩协同承受的钢桁梁桥荷载，并采用有限元法梁单元、三维壳单元和实体单元组合计算分配梁结构的应力和变形状态，用于分配梁结构力学性能的评估。根据分析结果对分配梁超过容许应力的部位提出加固构造措施并进行力学分析，为分配梁的结构加固设计提供了理论依据。

2. 工程概况

某新建双线特大桥属于欧亚大陆铁路运输网络南部通道的中国境内的组成部分之一，该双线特大桥采用上承式连续钢桁梁结构，全长为832m，共7跨（38.6+108+151.5+249+151.5+108+25.6）m，钢桁梁桥总重约为21000t。该桥跨越山高坡陡沟深的深切河谷地带，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。桥梁共设置两个主墩，两个边墩，并在边墩至主墩之间距边墩81m处设置高度分别为110.9m与133.5m的十二柱格构式超高临时支架以缩短钢桁梁桥悬臂架设长度，如图1所示。并在超高临时墩顶面设置三层箱型截面分配横梁将架设的钢桁梁上部荷载传递给整个超高临时墩。

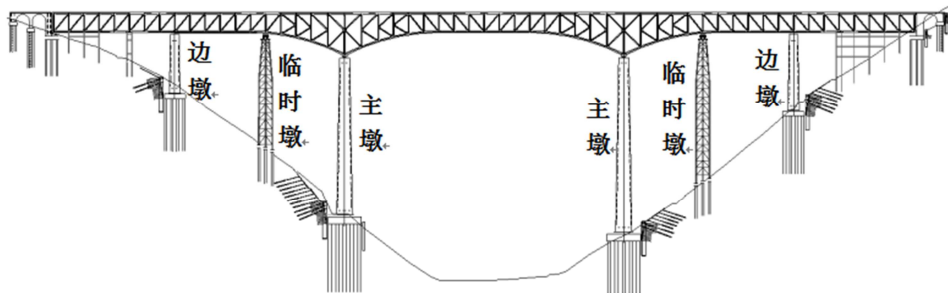


图1 某双线特大桥钢桁梁架设辅助工程总立面布置图。

3. 分配梁结构力学分析

根据钢桁梁架设施工方案和辅助悬臂架设临时结构的设计模型，本文建立了钢桁梁桥、超高临时墩和分配梁的力学模型，采用有限元法对钢桁梁桥过超高临时墩悬臂架设至主墩的各个工况进行了有限元分析，获得了在各施工阶段下的钢桁梁桥传递给超高临时墩顶部分配梁的荷

载，并对分配梁在最不利工况下的应力和位移状态进行了研究。

3.1. 分配梁结构

分配梁是钢桁梁桥悬臂架设施工中超高临时墩的大型临时结构，分配梁的受力状态和结构设计是整个钢桁梁桥与超高临时墩的安全施工中的关键与保障。该工程中采

用三层分配横梁结构将架设过程中的钢桁梁桥自重、架梁吊机荷载、施工荷载等上部荷载传递给超高临时墩，分配梁布置图如图2所示。分配梁均采用单箱单室的箱梁结构形式，分配梁由顶板、底板和腹板组合焊接而成，内设隔板及条形加劲肋。分配梁钢结构材质均为Q345B，相邻分配梁间顶板交接部位采用焊接连接，三层分配梁横截面如图3所示。

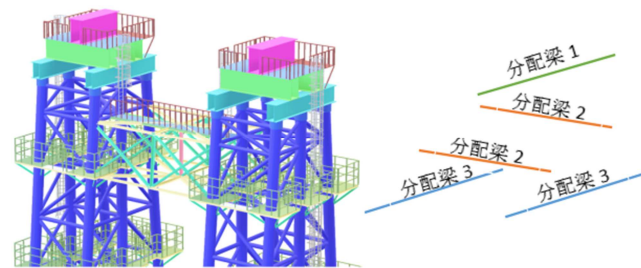


图2 分配梁布置示意图。

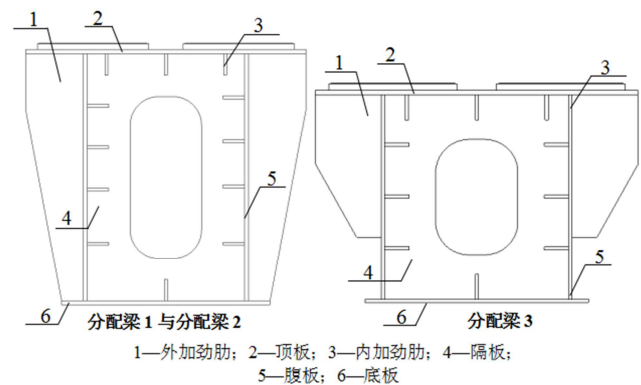


图3 分配梁横截面。

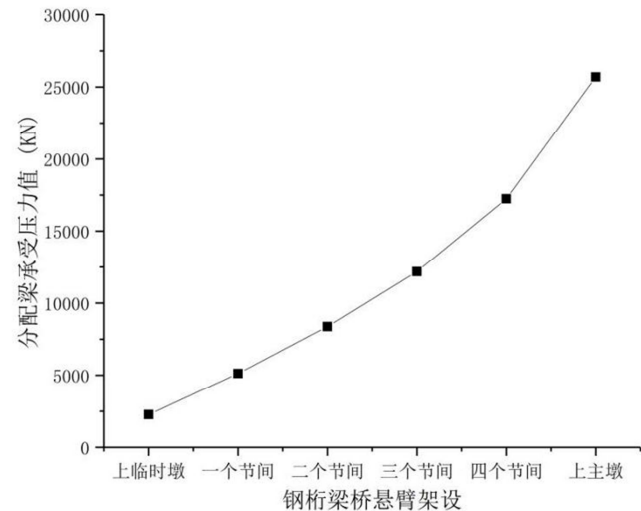


图4 施工各阶段下分配梁承受荷载值 (kN)。

3.2. 荷载工况分析

超高临时墩结构在架梁吊机架设至次边跨超高临时墩附近时，利用架梁吊机安装，并进行墩顶分配梁布置。在完成超高临时墩支架墩顶布置后，钢桁梁桥继续向主跨悬臂拼装5个节间钢梁，架设至主墩，并利用架梁吊机进

行墩顶布置。钢桁梁桥架设至超高临时墩时，超高临时墩分配梁开始受力，架设至主墩后，主墩起顶，超高临时墩脱空。在此钢桁梁桥悬臂架设过程中，分配梁逐渐受力，直到钢桁梁桥架设至上主墩时，分配梁承受的从钢桁梁桥传递下来的荷载达到最大。各阶段下分配梁承受从钢桁梁桥传递下来的荷载值如图4所示。

3.3. 分配梁结构力学分析模型

本文依据临时支墩和分配梁的实际受力情况，对结构的约束条件以及承受载荷进行了合理简化，建立了分配梁的力学计算模型。其中，三层分配梁由最顶层分配梁1直接承受由桥节点所传递的竖向力，分配梁2与分配梁1结构相同，但间接承受由桥节点所传递的竖向力，由此认为分配梁1与分配梁2和分配梁3相比属于更不利结构。在计算过程中，对分配梁1进行精有限元法计算和构造研究。在有限元模拟中对分配梁1采用壳单元建模，分配梁顶部垫层采用实体单元，并与分配梁1采用绑定约束。通过建立全桥与超高临时墩的整体有限元模型，对钢桁梁桥悬臂架设各个节间至上主墩时的施工过程分析后，得出在钢桁梁桥悬臂架设至上主墩时，桥节点所传递给分配梁的竖向力为2500t，并以均布压力的形式分布在分配梁1与钢桁梁桥节点的接触面上，如图5所示。并为模拟分配梁1实际受力情况，在分配梁1底部适当的释放顺桥向与横桥向位移，使之与分配梁2存在一些相对滑动，从而避免分配梁1底部出现较强的应力集中。分配梁1两端承受下层分配梁2的支撑，分配梁1为两端简支梁，其结构分析的边界条件设定为一端采用固定铰约束，另一端采用滑动铰约束。分配梁钢材材质均使用为Q345B钢材，分配梁1质量为19.8t。

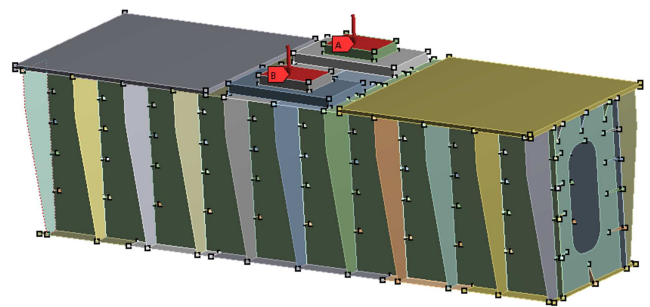


图5 分配梁1力学分析模型。

3.4. 分配梁结构局部分析

经过三维实体单元和壳单元模型的有限元法计算后，得到分配梁1在最不利荷载工况下的计算结果，其中分配梁1的整体Mises应力云图和组合位移云图分别见图6和图7。分配梁1的最大挠度为7.65mm，发生在顶板和垫层接触的边界处，小于规范值规定的 $l/400$ (16.15mm) [15]，则可认为分配梁1刚度满足相关规范和安全施工要求。但在分配梁1腹板与顶部垫层中存在大面积的Mises应力值超材料许用应力 (305MPa) 的区域，其中，分配梁1所承受的最大的Mises应力值为576.76MPa，发生于分配梁1与分配梁2搭接处 (支反力处)。且腹板中有较大区域面积的应力超过Q345B钢材许用应力，约为0.268m²。说明此

结构的强度不满足施工要求，需要对该结构的局部区域采取加固措施。

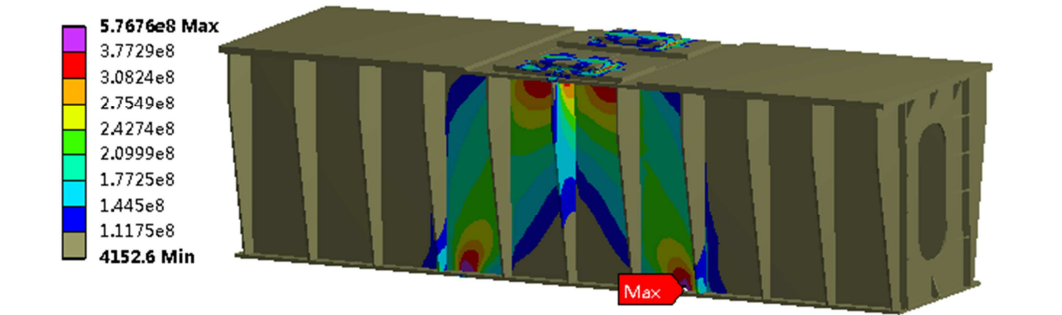


图6 分配梁1整体Mises应力分布（Pa）。

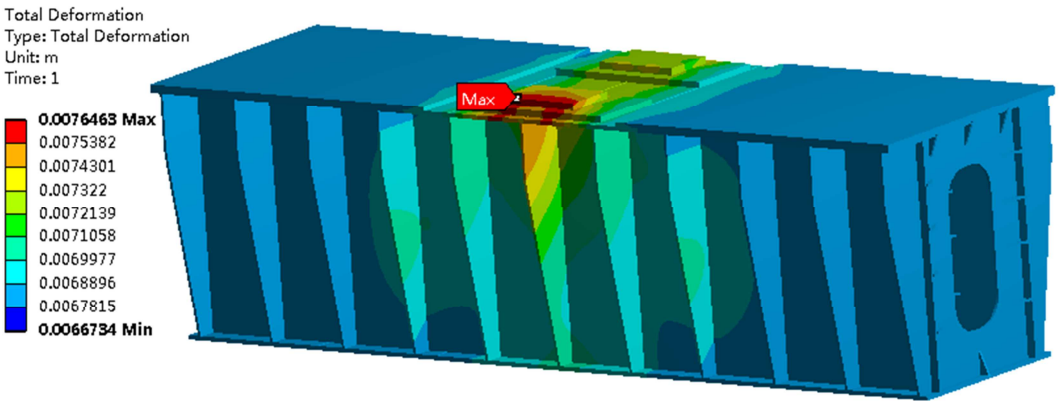


图7 分配梁1组合位移云图（m）。

4. 分配梁结构局部加固及应力场分析

4.1. 分配梁结构局部加固方法

在钢桁梁桥基于高支墩向主桥墩方向最大悬臂架设5个节间后（钢桁梁桥上主墩前夕），使得分配梁1直接承受钢桁梁桥2500t的竖向力，此时由于分配梁1受到的荷载较大，在分配梁1中尤其是腹板上出现较大面积的局部屈曲。故本文通过对分配梁结构有限元分析并参考文献[11]，提出了有效的加固方案。首先将分配梁1第一垫层的厚度由原来的50mm增加到100mm，并保证第一垫层能够跨越三块隔板；而后在第一垫层上方铺设第二垫层，尺寸

600mm×400mm×100mm，使得第二垫层跨越一块隔板。通过加大垫层几何尺度，可以更好的发挥隔板对结构整体的作用，改善钢桁梁桥与分配梁1之间力的传递效果，使得分配梁1中垫层下方隔板与顶板的应力值得到控制；并在分配梁1承受均布荷载作用范围内的上部腹板中以穿孔塞焊的方法补强共计4组厚度为20mm的补强板；且在腹板上分配梁1与分配梁2搭接处焊接平行于腹板和垂直于腹板的加劲肋；用以上三种加固方法，以增强箱梁支撑部位的局部强度，其中加劲板示意布置图如图8所示。平行于分配梁腹板的加劲板N1尺寸为415mm×390mm×30mm，垂直于腹板的加劲板N2尺寸为415mm×150mm×30mm，均采用Q345钢材。

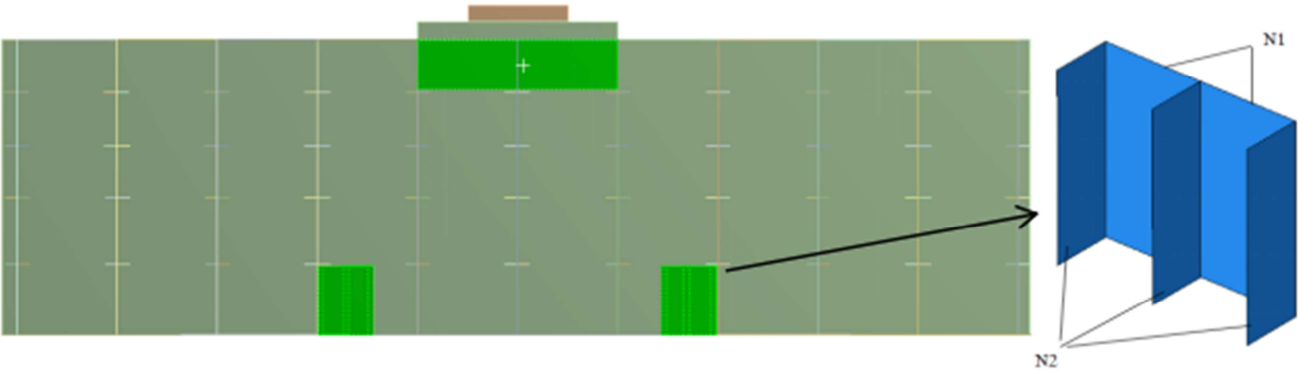


图8 加劲板示意布置图。

4.2. 分配梁加固结构应力场分析

经加固后分配梁结构用有限元法重分析,可得到对分配梁顶部垫层尺寸的优选设计。根据在腹板处焊接加强板对分配梁1提高结构强度的有限元分析结果,可知此时分配梁1腹板的最大Mises值为445.56MPa,发生在分配梁1焊接加强处、分配梁1底板与加强板交接处,且分配梁1的绝大部分区域的应力均未达到超过Q345B钢材许用应力,其中分配梁1的Mises应力云图如图9所示。且与未加

固的分配梁1结构相比,加固后的分配梁1结构的强度满足规范要求,仅在局部位置有Mises应力值超材料许用应力305MPa的区域,区域总面积约为0.0064m²,应力集中导致,其中分配梁1加固前后的结构Mises应力对比表如表1所示。由此可知本文加固方案可以有效提高分配梁1的结构强度,可以保证加固后的分配梁结构线形和应力都在规范规定和施工容许的范围之内,从而确保了钢桁梁桥和超高临时墩的施工安全。

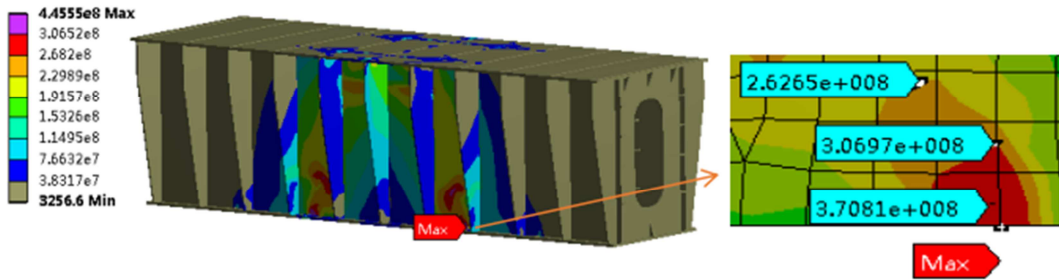


图9 加固后分配梁1结构的Mises工作应力云图 (Pa)。

表1 分配梁1结构加固前后的Mises工作应力对比表。

计算模型	分配梁1原结构设计	分配梁1加固后结构
结构最大Mises应力值 (MPa)	576.76	445.55
上部腹板最大Mises应力值 (MPa)	411.66	257.47
腹板上部Mises应力超305MPa区域面积 (m ²)	0.2368	0
下部腹板最大Mises应力值 (MPa)	576.76	445.55
腹板下部Mises应力超305MPa区域面积 (m ²)	0.032	0.0064
隔板最大Mises应力值 (MPa)	257.37	209.77

5. 结语

本文以某特大钢桁梁桥在悬臂架设施工过程中超高临时墩顶部的分配梁为研究对象,首先建立了钢桁梁桥,分配梁以及临时墩的梁单元力学模型,然后建立了最不利分配梁的壳-实体组合单元模型,对分配梁结构在最不利工况下进行了力学分析与加固设计。结论如下:

在特大钢桁梁桥的悬臂架设施工过程中,临时支墩可被用来缩短钢桁梁桥悬臂施工长度,从而确保施工安全。而临时支墩因为其具有的临时性与简便性,往往不能承受较大的荷载,所以在临时墩顶部设置分配梁来率先承受由钢桁梁桥直接传递下来的荷载,并将其传递给临时墩的主钢柱,就可以有效的降低钢桁梁桥荷载直接传递给临时墩的不利影响。

在合理的构造设计之下,本文所提出的三层分配梁结构及相对应的加固措施,可以明显降低钢桁梁桥悬臂架过程中所传递给分配梁受力的不利影响。而且仅在分配梁的支撑部位产生较大的应力,但此处为分配梁1的支反力处,可以认为此应力为应力集中所致,而分配梁1的整体部位的应力和挠度变形状态均在Q345B钢材适用范围之内,并存在着较充裕的安全裕度。本文提出的分配梁结构加固措施可以为大跨度桥梁超高临时墩顶部分配梁结构设计提供参考。

参考文献

[1] 傅伟坚, 杨二武, 王乾霖, 等. 苏拉马都跨海大桥临时墩设计与施工 [J]. 公路, 2011, 24 (2): 228-230.

[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] 宋永安, 张崇彬, 虞业强. 高墩大跨径预应力混凝土连续刚构桥0号块的托架法施工 [J]. 公路, 2005, 50 (8): 52-56.

[4] 张壮, 牛忠荣, 吴健安, 黄煜寰, 易中楼. 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.

[5] 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.

[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] 王俊, 李传习. 变曲率竖曲线钢箱梁顶推施工临时墩标高调整方案确定 [J]. 中外公路, 2011, 31 (3): 177-182.
- [10] 王希岗. 钢桁梁顶推施工中滑道梁设计与安装 [J]. 铁道建筑技术, 2017, 55 (3): 37-40.
- [11] 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 (04): 105-109+115.
- [12] 罗金辉, 李元齐, 张元植, 等. 超大截面钢管混凝土柱分配梁构造节点下轴压荷载传递试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 61 (10): 49-60.
- [13] 张元植, 罗金辉, 李元齐, 等. 巨型钢管混凝土柱分配梁构造下竖向荷载传递机理研究 (II): 数值分析 [J]. 土木工程学报, 2016, 63 (12): 20-30.
- [14] 程江敏, 程波, 邱鹤, 等. 钢结构加固方法研究进展 [J]. 钢结构, 2012, 27 (11): 1-7.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.