

DOI: 10.7672/sgjs2026100119

高速公路钢箱梁吊装工程稳定性分析与设计*

王传钢¹, 于洋², 韩伟强¹, 王雪艳³, 周子怡⁴

(1. 中铁七局集团南京工程有限公司, 江苏 南京 210012; 2. 中铁七局集团有限公司, 河南 郑州 450016; 3. 西安工程大学城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048; 4. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 针对武陟至济源段上跨运营高速公路钢箱梁吊装工程,开展系统的稳定性分析与设计研究。通过理论计算与有限元模拟相结合,依据相关规范标准,开展吊耳设计与选型、钢丝绳选型与验算、220t和800t起重机的抗倾覆稳定性验算、支腿及履带处地基承载力分析及临时支撑体系的稳定性评估。结果表明:220t和800t起重机的抗倾覆力矩分别为 $5\,112\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $92\,604\text{kN}\cdot\text{m}$,满足抗倾覆要求;吊耳和钢丝绳设计具备足够安全裕度,临时支撑体系的应力和变形均在相关规范和标准的允许范围内,且满足刚度要求。

[关键词] 高速公路;钢箱梁;吊装;支撑体系;稳定性;承载力;数值模拟

[中图分类号] U448.36

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0119-07

Stability Analysis and Design of Steel Box Girder Installation Engineering of Expressways

WANG Chuangang¹, YU Yang², HAN Weiqiang¹, WANG Xueyan³, ZHOU Ziyi⁴

(1. China Railway Seventh Group Nanjing Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210012, China;

2. China Railway Seventh Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China;

3. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

4. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Aiming at the steel box girder lifting project of Wuzhi—Jiyuan section across the operating expressway, the stability analysis and design research of the system are carried out. Through the combination of theoretical calculation and finite element simulation, according to the relevant specifications and standards, the design and selection of lifting lugs, the selection and checking of wire ropes, the anti-overturning stability checking of 220t and 800t cranes, the bearing capacity analysis of the foundation at the outriggers and crawlers, and the stability evaluation of the temporary support system are carried out. The results show that the anti-overturning torques of 220t and 800t cranes are $5\,112\text{kN}\cdot\text{m}$ and $92\,604\text{kN}\cdot\text{m}$ respectively, which meet the anti-overturning requirements. The design of lifting lugs and wire ropes has sufficient safety margin. The stress and deformation of the temporary support system are within the allowable range of relevant codes and standards, and meet the stiffness requirements.

Keywords: expressway; steel box girders; lifting; support systems; stability; bearing capacity; simulation

0 引言

在跨越既有运营高速公路的建设中,钢箱梁吊装施工是实现桥梁架设的关键技术环节。跨运营高速钢箱梁吊装施工具有极高的技术复杂性和安

全风险性。一方面,钢箱梁本身结构庞大,对吊装设备的选型、起吊点的确定、吊装工艺的把控均提出了严苛要求;另一方面,施工过程中须确保下方运营高速公路的正常运行与安全,这需要协调各方面进行精准的交通组织及建立完善的安全防护措施。

钢箱梁可在工厂预制、现场吊装,可极大地缩短整体施工周期。工厂制作可将其外形尺寸和内

* 河南省住房和城乡建设科技计划(2023)(K-2325);陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-624);陕西省教育厅服务地方专项科研计划(22JC046)

[作者简介] 王传钢,高级工程师,E-mail:13256502586@163.com

[收稿日期] 2025-10-21

部结构的偏差控制在极小范围内,能有效避免现场浇筑可能出现的质量问题。杜传鹏等^[1]采用特殊工艺安装钢箱梁节段,确保了挪威哈罗格兰德大桥在气候环境恶劣的条件下顺利完成。邓渊等^[2]通过对桥面吊装施工的安全性进行验算,采用数值模拟软件施加移动荷载判断最不利位置节段,分析应力和变形结果。张爱平^[3]采用空间有限元分析法对钢箱梁进行整体和局部效应分析,以评估钢箱梁的线形状和应力水平,从而保证钢箱梁在施工过程中处于安全可控状态。谢银龙等^[4]通过有限元计算软件对临时支架的承载力进行验算,计算结果均符合国家标准,表明该工程使用的临时支架具有较高的强度和安全性。李红等^[5]针对曲线钢箱梁桥吊装过程的稳定性,计算分析稳定系数与吊点位置、曲率半径、梁段长度、倾斜角度及风荷载的相关性,结果表明不同吊装方法对横向抗倾覆稳定性影响不同,横风对稳定系数影响较大,在吊装过程中,应尽量保持各吊点钢丝绳工作的同步性,避免节段发生倾斜,超过六级风时,建议停止施工。

钢箱梁吊装涉及重型设备操作、复杂受力分析和地基稳定性评估,稍有不慎可能导致倾覆、构件失效或施工事故。本文以二铺营枢纽钢箱梁吊装为研究对象,系统分析了起重机抗倾覆稳定性、支腿及履带处地基承载力、吊耳选型、钢丝绳选型及临时支撑体系的受力与变形特性,以确保设计方案的安全和可靠,研究结果可为类似工程的施工设计提供参考。

1 设计方案与参数选取

1.1 工程概况

沿黄高速公路武陟至济源段,路线全长约 100.132km,起于新乡市平原示范区祝楼乡西,与晋新高速公路相接,向西经焦作市武陟县、温县、孟州、济源市东,止于济源市轵城镇东,与荷宝高速公路顺接。主线二铺营枢纽匝道桥为单箱双室现浇桥现浇箱梁,长 1 926m,共 21 联 65 跨;其余主线桥均为装配式预制空心板梁桥和箱梁,预制 25m 梁 78 片,预制 30m 梁 12 片,16m 空心板 191 片,钢箱梁两联共计 220m。二铺营枢纽钢箱梁吊装工程采用 220t 汽车式起重机和 800t 履带式起重机分别进行散吊(单节段,最大 59t)和整吊(组合节段,最大 225t)操作。设计方案包括起重机选型、吊耳设计、钢丝绳选型和临时支撑体系的参数设置,应充分考虑构件自重、施工工况和现场条件。

本工程跨郑云高速公路,上跨部分采用一次吊装,跨度达 30.5m,单体重 240t。采用 GPS、自动全

站仪和先进的吊装设备精准定位桥墩、桥台与钢箱梁的位置,确保钢箱梁安装精度为毫米级别。使用大吨位履带式起重机、汽车式起重机,可减少高空作业量,结合模拟软件优化施工方案,提升吊装的安全性及效率,确保钢箱梁吊装高质量完成。相较于钢箱梁顶推施工,跨既有高速段采用整体吊装和散吊相结合,可减小对运营高速行驶的影响,又可缩短隐患的持续时间,极大地降低了高速公路上方施工掉梁风险,提高了安全系数。

1.2 吊耳选型

吊耳作为钢箱梁与起重机连接的关键部件,其设计需保证具有足够的强度和稳定性。每一分段的钢梁均按刚体简化,根据计算确定构件重心位置,在面板上与腹板(或纵肋)及横隔板交汇处设置临时吊耳^[6]。散吊节段采用 4 点起吊,选用 10~20t 级吊耳(厚 20mm,宽 200mm);整吊节段则采用 8 点起吊,选用 30~40t 级吊耳(厚 30mm,宽 280mm)。吊耳尺寸及参数如图 1、表 1 所示。吊耳腹板与顶板采用全熔透角焊缝,耳板与顶板采用双面贴角焊缝,焊脚尺寸 8mm。吊耳在厂内施焊完毕后,焊缝需经 100% 超声波探伤(UT),达到 BI 级标准。吊耳材质为 Q345 钢。

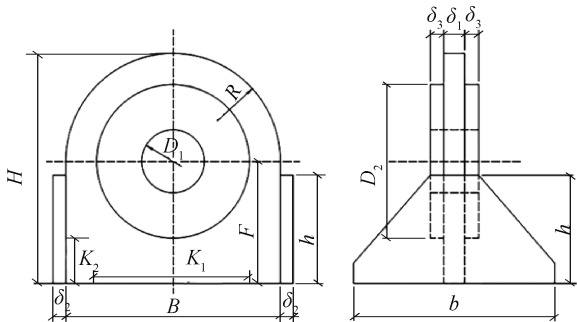


图 1 吊耳尺寸

Fig. 1 Dimensions of lifting ear

1.3 钢丝绳选型

钢丝绳选型考虑吊装过程中的拉力及安全系数 $K=6$,当被起吊钢梁自重一定时,钢丝绳与水平面夹角 θ 越大,吊索所受拉力越小,故钢丝绳与水平面夹角设为 60° 以优化受力。散吊单节段重 59t,采用 4 根 $\phi 46$ 纤维芯钢丝绳(6×36 类,公称抗拉强度 1 770MPa),最小破断拉力 1 240kN;整吊组合节段重 225t,采用 8 根 $\phi 64$ 纤维芯钢丝绳(6×36 类,公称抗拉强度 1 770MPa),最小破断拉力 2 390kN。钢丝绳布置如图 2 所示。

1.4 临时支撑体系

临时支撑用于承受钢箱梁在拼装过程中的荷载,分为高速公路外侧和内侧 2 种布置。

表 1 吊耳参数
Table 1 Lifting ear parameters

允许 负荷/ t	吊耳尺寸/mm										焊脚高度/mm		配用卸 扣直 径/mm	
	吊耳板 厚度 δ_1	吊耳高 度 H	吊耳板 宽度 B	销轴孔 直径 D_1	圆角半 径 R	耳底板 长度 F	底板厚 度 δ_2	耳板净 高度 h	吊耳顶 部圆弧 段高度 b	加劲板 厚度 δ_3	螺栓孔 高度 D_2	加劲板 宽度 K_1		加劲板 高度 K_2
10~20	20	210	200	60	100	120(110)	—	—	—	—	—	8	—	46
30~40	30	280	280	80	140	160(140)	10	140	260	—	—	12	6	58

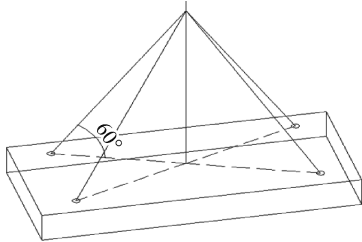


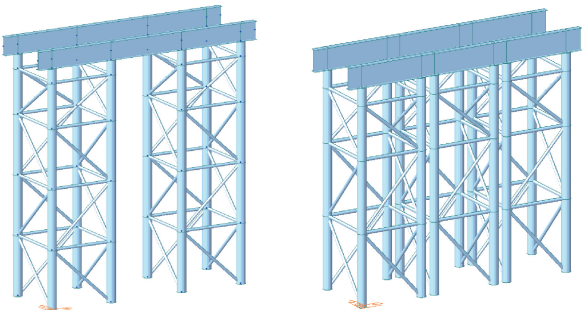
图 2 钢丝绳吊装布置

Fig. 2 Arrangement of wire rope lifting

1) 外侧支撑:每环口处设置 2 组格构柱,中心间距 2.1m×2.1m,支架间距 4.6m。主肢截面为 $\phi 299\times 12\text{mm}$,缀条为 $\phi 95\times 8$,最大高度 8m。顶部设置 HN600×200×11/17 型钢分配梁,底部通过化学螺栓固定于 3m×3m×0.5m 混凝土基础上。

2) 内侧支撑:每环口处设置 3 组格构柱,支架间距 2.55m,最大高度 6m,基础为 8.1m×2.55m×0.5m 混凝土基座,其他参数同外侧支撑。

采用 MIDAS Civil 有限元软件进行受力分析,临时支撑模型如图 3 所示。



a 高速公路外侧支撑模型 b 高速公路内侧支撑模型

图 3 临时支撑模型

Fig. 3 Temporary support model

本工程选用 Q345 高强钢作为吊耳的制造材料,并采用全熔透双面贴角焊工艺,焊缝经 100% 超声波探伤,达到 BI 级标准,确保了吊耳的连接强度与疲劳耐久性,有效防范了吊装过程中因钢丝绳断裂引发的安全事故。

2 稳定性分析

2.1 起重机抗倾覆稳定性验算

抗倾覆稳定性按 GB/T 3811—2008《起重机设

计规范》公式验证:

$$K_G M_G - K_Q M_Q - K_W M_W \geq 0 \tag{1}$$

式中: K_G 为自重加权系数,取 1; K_Q 为起升荷载加权系数,取 1.15; K_W 为风动载加权系数,取 1; M_G, M_Q, M_W 分别为汽车式起重机自重、起升荷载、风动荷载对倾覆边的力矩。

1) 当取用 220t 起重机时(见表 2),为保证起重机在吊装过程中的稳定,需进行抗倾覆验算,即使稳定力矩大于倾覆力矩^[7],220t 起重机配重为 67t,由于顶吊点处吊重和工作半径最大,故以顶吊点处起重机吊装梁体为验算对象。

表 2 220t 起重机参数

Table 2 Parameters of 220t cranes					
自重 G/kN	配重 T/kN	起升荷 载 Q/kN	风荷载 W/kN	工作半 径/m	风载高 度/m
720	670	600	120	8	10

$K_G M_G - K_Q M_Q - K_W M_W = 5\,112\text{kN} \cdot \text{m} > 0$,可知 220t 起重机满足抗倾覆稳定性要求。

2) 当取用 800t 起重机时,800t 起重机参数如表 3 所示。

表 3 800t 起重机参数

Table 3 Parameters of 800t cranes					
自重 G/kN	配重 T/kN	起升荷 载 Q/kN	风荷载 W/kN	工作半 径/m	风载高 度/m
5\,379	2\,650	2\,400	480	38	10

$K_G M_G - K_Q M_Q - K_W M_W = 92\,604\text{kN} \cdot \text{m} > 0$,可知 800t 起重机满足抗倾覆稳定性要求。

2.2 起重机支腿处地基承载力稳定性

1) 当取用 220t 起重机时,220t 起重机工作参数表 4 所示。

表 4 220t 起重机工作参数

Table 4 Operating parameters of 220t cranes					
自重 G/kN	配重 T/kN	起升荷 载 Q/kN	支腿跨 距/m	支腿垫 板/m	工作半 径/m
720	670	600	8.8×8.8	3×3	8

最不利状态为吊物旋转至某一支腿上方,该支腿最大受力如下:

$$F = \frac{G_1 + G_2 + Q}{4} + \frac{QR}{\sqrt{A^2 + B^2}} = 883\text{kN} \quad (2)$$

则支腿处垫板的对地面的压应力为 $P = F/A = 98\text{kPa}$ 。根据计算结果,起重机支腿处地基承载力要大于 98kPa 。考虑部分安全储备,要求地基承载力不低于 120kPa 。

2) 当取用 800t 履带式起重机时,其工作质量为 537.9t ,在本吊装使用工况时,超起配重 425t ,主机后配重 265t ,整吊段最重 240t 。故吊装时的最大质量为 $537.9+425+265+240 = 1\,467.9\text{t}$ 。履带长度约 12m ,间距 9.05m ,工作时在履带下满铺 $3\text{m}\times 6\text{m}$ 路基板,共需 5 块,如图 4 所示,履带式起重机移动时,实际受力为 4 块。故工作时地面受力面积为 $3\times 6\times 4\times 2 = 144\text{m}^2$,考虑 1.5 的不均匀系数,可得吊装工况下履带对地面的应力 $P = 153\text{kPa}$ 。因此对地面承载力要求为 0.15MPa 可满足施工要求。

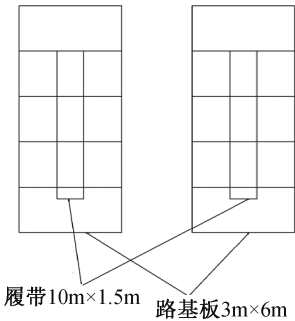


图 4 履带式起重机路基板布置

Fig. 4 Layout of the tracked crane's base plates

2.3 临时支撑体系稳定性分析

临时支撑体系包括调节钢管、分配梁(H型钢)、临时支架(钢管立柱、柱间支撑)和基础,其中调节钢管起调整标高的作用,通过调节钢管高度来控制钢梁就位标高;分配梁主要起分配荷载的作用;临时支架和基础主要充当临时支撑和承载钢梁质量。

2.3.1 高速公路外侧支撑

根据本项目特点,A,B 匝道临时支架布置高速外侧为每个环口处两组支架,本计算选取最重梁段自重、最高支架高度进行支架受力分析。采用 MIDAS Civil 有限元软件模拟吊装过程对临时支撑的受力作用。

恒荷载由钢箱梁自重及格构柱自重组成,格构柱自重由软件自动生成;钢箱梁按集中荷载计算,集中荷载作用于调节短柱上,并通过分配梁传递给立柱。钢箱梁质量按最不利工况取值,即取相邻两梁段质量之和的最大值的一半,经计算为 131t 。每

个环口处采用 8 根调节管支撑在梁段下方,每根调节管受力 164kN 。活荷载考虑吊装时相邻梁段桥面上存在人员及部分机械,需施加施工荷载;施工时应避免在挑臂上堆载,最重节段桥面面积约为 $18\times 10.5 = 189\text{m}^2$,活荷载总重 189kN ,分布于调节管上为 $189/8 \approx 24\text{kN}$ 。风荷载根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》,按照 50 年一遇风压取值,迎风面积取钢箱梁腹板面积,以节点荷载加载在调节短管上。风压取 1.03kN/m^2 ,迎风面积为 $18\times 3\text{m}^2$,每个调节管风荷载为 6.95kN 。根据 GB 50068—2018《建筑结构可靠性设计统一标准》,为简化计算,恒荷载分项系数取 1.3,活荷载和 wind 荷载分项系数取 $1.5^{[8]}$,则荷载组合为 $1.0\times (1.3D+1.5L+1.5W)$ 。

格构柱底部立柱均采用刚接节点,如图 5 所示。

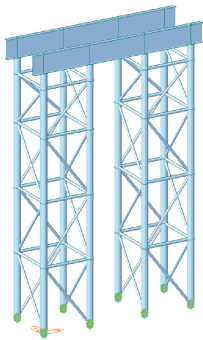


图 5 底部立柱钢节点(外侧)

Fig. 5 Steel nodes of the bottom columns(outside)

根据钢箱梁施工顺序,临时受力状态按吊装顺序逐次加载(考虑最不利工况),临时支撑应力计算结果如图 6,7 所示。组合应力最大值为 $1.3D+1.5L = 29.5\text{MPa} < 215\text{MPa}$,满足承载力要求。

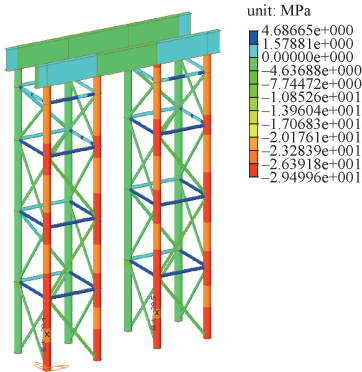


图 6 最重梁段应力分布(外侧)

Fig. 6 Stress distribution of the heaviest beam section(outside)

支撑变形分布如图 8,9 所示。支撑最大变形值为 $1.0D+1.0L = 2.046\text{mm}$,小于允许变形限值 L_w (外侧支架计算高度)/1 000 = 8mm 。

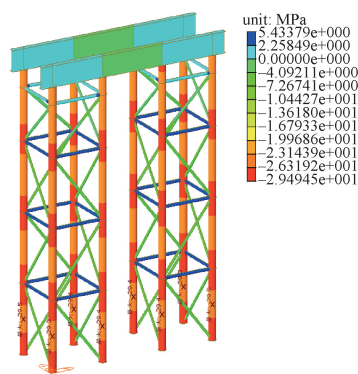


图 7 相邻梁段应力分布(外侧)

Fig. 7 Stress distribution of adjacent beam sections(outside)

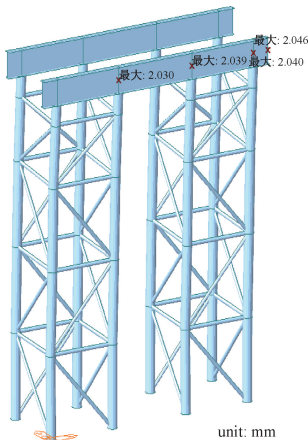


图 8 最高梁段变形分布(外侧)

Fig. 8 Deformation distribution of the highest beam section(outside)

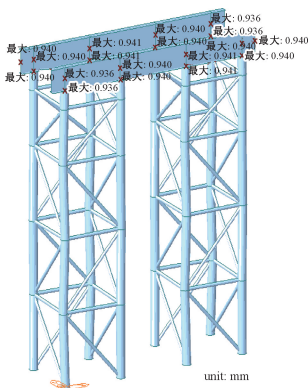


图 9 相邻梁段变形分布(外侧)

Fig. 9 Deformation distribution of adjacent beam sections(outside)

支座沿 z 向和 y 向提取反力如图 10 所示。由图 10 可知,临时支撑立柱底部未出现拉力,表明支架不会倾覆。

支架反力和约为 $271.9 \times 8 = 2\,175.2\text{ kN}$;临时支撑下侧设置 2 个 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 混凝土基础。混凝土

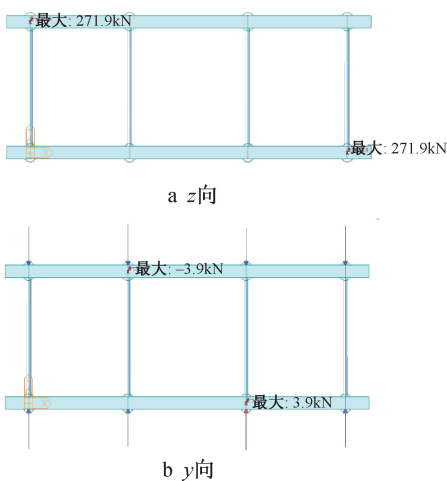


图 10 支座反力(外侧)

Fig. 10 Support reaction(outside)

土基础承载力计算为 $P = F/A = 102\text{ kPa}$ 。考虑不利因素,要求地基承载力大于 120 kPa 。若现场不满足,则需进行换填压实至满足要求。

在支撑体系的设计与分析过程中应充分考虑风荷载、施工活荷载等不确定因素对吊装与支撑稳定性的影响,尤其在风荷载控制上,针对钢箱梁大尺寸、高迎风面积的特性,制定施工过程中风速限值控制与应急预案,确保吊装过程在 6 级以上风力时暂停作业,以保障吊装安全。

2.3.2 高速公路内侧支撑

根据本项目特点,A,B 匝道临时支架在高速公路内侧每个环口处设置 3 组支架。本计算选取最重梁段及最高支架进行支架受力分析,并通过 MIDAS Civil 有限元软件模拟吊装过程中临时支撑的受力情况。

A 匝道整吊段(B+C)和 A 节段质量和最大,取一半质量为 173 t 。每个环口处采用 12 根调节管支撑在梁段下方,每根调节管受力按 144 kN 计算。最重节段桥面面积约为 $24 \times 10.5 = 252\text{ m}^2$,活荷载 252 kN ,分布于每根调节管上为 $252/12 = 21\text{ kN}$ 。风荷载按 50 年一遇风压取值,迎风面积取钢箱梁腹板面积,以节点荷载加载在调节短管上。风压取 1.03 kN/m^2 ,迎风面积 $24 \times 3\text{ m}^2$,每根调节管 6.18 kN 。根据《建筑结构可靠性设计统一标准》,为简化计算,恒荷载分项系数取 1.3,活荷载和风荷载分项系数取 1.5,则荷载组合为 $1.0 \times (1.3D + 1.5L + 1.5W)$ 。

格构柱底部立柱均采用刚接节点,如图 11 所示。

临时支撑应力计算结果如图 12,13 所示。

组合应力最大值为 $1.3D + 1.5L = 25.8\text{ MPa} < 215\text{ MPa}$,满足承载力要求。

临时支撑变形分布如图 14,15 所示。

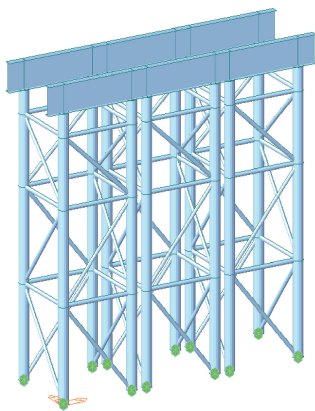


图 11 底部立柱钢节点(内侧)

Fig. 11 Steel nodes of the bottom columns(inside)

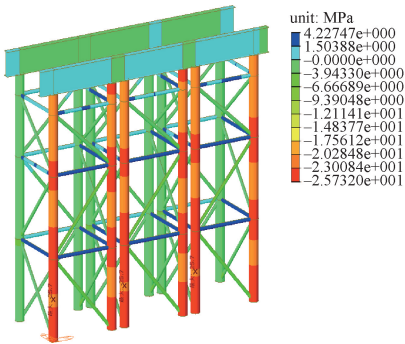


图 12 最重梁段应力分布(内侧)

Fig. 12 Stress distribution of the heaviest beam section(inside)

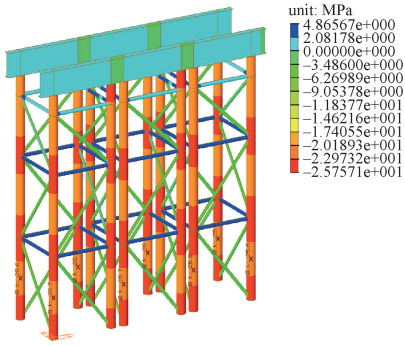


图 13 相邻梁段应力分布(内侧)

Fig. 13 Stress distribution of adjacent beam sections(inside)

临时支撑最大变形值为 $1.0D + 1.0L = 1.128\text{mm}$, 小于允许变形限值 L_n (内侧支架计算高度)/1 000=6mm。

提取支座反力如图 16 所示。临时支撑立柱底部未出现拉力,表明支架不会倾覆。支架反力和约为 $239 \times 12 = 2\,868\text{kN}$;临时支撑下侧设置 1 个 $8\text{m} \times 2.55\text{m} \times 0.5\text{m}$ 混凝土基础。混凝土基础承载力 $P = F/A = 116.6\text{kPa}$ 。考虑不利因素,要求地基承载力大于 120kPa ,若现场不满足,则需进行换填压实至

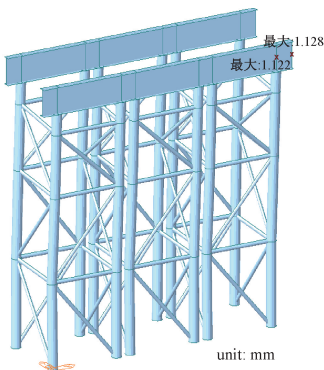


图 14 最重梁段变形分布(内侧)

Fig. 14 Deformation distribution of the heaviest beam section(inside)

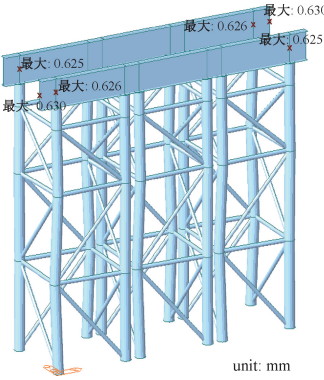
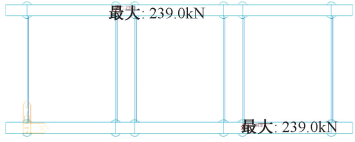


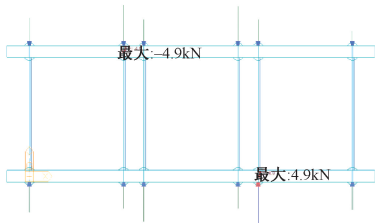
图 15 相邻梁段变形分布(内侧)

Fig. 15 Deformation distribution of adjacent beam sections(inside)

满足要求。



a z向



b y向

图 16 支座反力(内侧)

Fig. 16 Support reaction(inside)

针对吊装与拼装阶段的不同受力需求,设计具备标准化、模块化的临时支撑体系,对外侧与内侧支撑受力进行有限元分析验证,确保在最不利荷载组合下,支撑体系的强度、刚度及地基承载力均满足国家规范标准。各类临时支撑的组合应力与变

形值均低于允许限值,基础承载力通过地基加固与换填措施,使其满足现场安全要求。

3 稳定性分析

对二铺营枢纽钢箱梁吊装工程开展了全面的分析与设计,针对跨越既有运营高速公路面临的施工环境复杂、吊装荷载大及精度要求高等关键问题,综合应用了多项施工技术与方法,有效提升了工程设计与施工的科学性与安全性。稳定性分析结果如下。

1)220t 和 800t 起重机的抗倾覆力矩分别为 5 112kN·m 和 92 604kN·m,表明在最大吊重和最大工作半径下,起重机具有足够的稳定性。风荷载按起升荷载的 20%考虑,符合规范要求,计算结果保守可靠。

2)220t 起重机支腿处地基压应力为 98kPa,建议承载力不低于 120kPa;800t 起重机履带处压应力为 153kPa,地基承载力要求不低于 150kPa。两者的地基承载力需求均合理,且通过换填压实可满足现场要求。

3)外侧和内侧支撑的组合应力分别为 29.5, 25.8MPa;变形分别为 2.046,1.128mm,满足刚度要求。临时支撑体系的应力和变形均在允许范围内,可确保支撑体系安全可靠。

4 结语

本研究结合力学分析与 MIDAS Civil 有限元仿真技术,对起重机抗倾覆稳定性、支腿及履带处地基承载力、临时支撑体系的受力及变形特性等多个核心环节进行了系统的仿真计算与安全性评估,不仅系统性地保障了钢箱梁吊装施工过程中稳定性、满足精度控制等要求,也为类似工程提供了全生命周期、全流程设计与施工的技术参考。未来在此基础上,仍可进一步探索智能监测、数字孪生技术与无人化吊装技术等前沿手段,不断提升大型桥梁钢结构吊装工程的智能化水平。

参考文献:

[1] 杜传鹏,卢伟,陈正,等.挪威哈罗格兰德大桥钢箱梁吊装关

键技术研究[J].公路,2022,67(12):210-215.

DU C P,LU W,CHEN Z,et al. Research on key techniques of hoisting steel box girder of harrogand bridge in Norway [J]. Highway,2022,67(12):210-215.

[2] 邓渊,邱亚锋,李军,等.钢箱梁桥面吊装设计与有限元分析[J].公路,2021,66(12):149-154.

DENG Y,QIU Y F,LI J,et al. Design and finite element analysis of steel box girder bridge deck hoisting[J]. Highway,2021,66(12):149-154.

[3] 张爱平.钢箱梁节段施工受力性能分析[J].公路,2021,66(1):157-161.

ZHANG A P. Mechanical performance analysis of steel box girder segment construction[J]. Highway,2021,66(1):157-161.

[4] 谢银龙,金顺清,刘冲.桥梁钢结构组合式临时支架设计与承载力验算[J].建筑科技,2024,8(11):25-31,47.

XIE Y L,JIN S Q,LIU C. Design and load-bearing capacity verification of combined temporary supports for bridge steel structures[J]. Building technology,2024,8(11):25-31,47.

[5] 李红,丁炜,薛松涛,等.曲线钢箱梁桥吊装施工稳定性分析及控制[J].南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(2):196-201,210.

LI H,DING W,XUE S T,et al. Stability analysis and control of hoisting construction for curved steel box girder bridge [J]. Journal of Nanjing Tech University (natural science edition), 2023,45(2):196-201,210.

[6] 张卢煌,陈伟仁,肖帅伟,等.大节段宽翼缘钢箱梁水上浮吊抬吊技术应用[J].建筑机械,2021(6):89-94.

ZHANG L H,CHEN W R,XIAO S W,et al. Application of floating crane lifting technology for steel box girder with large section and wide flange[J]. Construction machinery,2021(6):89-94.

[7] 夏彬,崔杰,曹旭,等.复杂钢结构吊装及施工仿真技术研究[J].安徽建筑,2023,30(10):77-79.

XIA B,CUI J,CAO X,et al. Research on hoisting and construction simulation technology of complex steel structure[J]. Anhui architecture,2023,30(10):77-79.

[8] 蒋利学,王卓琳.我国现行建筑结构设计规范可靠度的校核与分析[J].结构工程师,2020,36(2):1-9.

JIANG L X,WANG Z L. Verification and analysis of reliability of current design codes for building structures in our country [J]. Structural engineers,2020,36(2):1-9.