

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202202172024101980

文章编号:1674-599X(2024)05-0001-07

引用格式:殷新锋,王泊,马磊,等.既有钢桁梁桥加固顶升模型验证及参数分析[J].交通科学与工程,2024,40(5):1-7.

Citation: YIN Xinfeng, WANG Bo, MA Lei, et al. Verification and parameter analysis of reinforcement and jacking model of existing steel truss bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 1-7.

既有钢桁梁桥加固顶升模型验证及参数分析

殷新锋¹,王泊^{1,2},马磊³,林伟⁴,苟勇⁴

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.中铁建工集团长沙市规划设计院有限责任公司,湖南 长沙 410000;3.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海 200125;4.四川公路桥梁建设集团有限公司,四川 成都 610041)

摘要: 现有钢桁梁桥在运营过程中,因地质条件受损、桥梁本身的疲劳老化及锈蚀等,其结构刚度相较于初始状态会有所降低。以某既有钢桁梁桥为研究背景,通过现场采集应变及变形数据,对有限元模型进行验证,并基于刚度参数及温度参数变化,分析该桥在顶升施工阶段的结构受力特征。数值分析结果表明,在桥梁加固顶升过程中,桥梁结构变形受刚度损失及温度变化的影响较大;当整桥刚度分别折减10%、15%、20%时,桥梁最大变形量分别增加了12.5%、20.0%、25.3%;当温差为20℃时,桥梁竖向及纵向最大变形量分别为15.7、35.1 mm。研究结果可为同类钢桁梁桥的加固顶升提供一定的参考。

关键词: 钢桁梁桥;加固顶升施工;有限元分析;刚度参数;温度参数

中图分类号:U446

文献标志码:A

Verification and parameter analysis of reinforcement and jacking model of existing steel truss bridge

YIN Xinfeng¹, WANG Bo^{1,2}, MA Lei³, LIN Wei⁴, GOU Yong⁴

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. China Railway Construction Engineering Group Changsha Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 4. Sichuan Road & Bridge (Group) Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: During the operation of existing steel truss bridges, structural rigidity decreases compared to its initial state due to damage to geological conditions and fatigue aging and corrosion of bridges. With an existing steel truss bridge as the research object, the finite element model was verified with the strain and deformation data collected on site, and the stress characteristics of the bridge structure during the jacking construction stage were analyzed depending on the changes in stiffness and temperature parameters. Numerical analysis results show that the deformation of the bridge structure is greatly influenced by the loss of stiffness and temperature changes during the reinforcement and jacking of the bridge. When the stiffness of the entire bridge is reduced by 10%, 15%, and 20%, the maximum deformation of the bridge increases by 12.5%, 20.0%, and 25.3%, respectively. When the temperature difference is 20℃, the maximum vertical and longitudinal deformation of the bridge is 15.7 mm and 35.1 mm, respectively. This research can provide reference for the reinforcement and

收稿日期:2022-02-17

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52078057)

通信作者:殷新锋(1980—),男,教授,主要从事桥梁健康监测方面的研究工作。E-mail:yinxinfeng@163.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

jacking of the same type of steel truss bridges.

Key words: steel truss bridge; reinforcement and jacking construction; finite element analysis; stiffness parameter; temperature parameter

在国内外运营的大量桥梁中,线路优化改造、地质条件受损、桥梁本身的疲劳老化及锈蚀等使得桥梁结构刚度相对于设计值有所降低,不能满足设计时的要求,进而使桥梁存在安全隐患,但若完全拆除重建,费用高且工期长^[1-2]。全面、及时进行桥梁维修加固能解决安全隐患,提高通行效率,更好地实现桥梁的经济效益和社会效益。顶升技术作为旧桥加固改造的一个重要方法,已经得到广泛应用。

某钢桁梁桥主塔底部转盘应进行更换。根据调查,该桥已运行多年,桥梁整体钢结构存在一定程度的锈蚀,适宜采用全桥同步顶升技术更换转盘。在同步顶升过程中,考虑到桥梁实际刚度折减情况及顶升前后现场温度的变化^[3],本文利用有限元软件对桥梁刚度参数及环境温差进行模拟,对全桥进行应力分析及高程控制,把控各施工细节,保证施工目标的实现^[4-5]。

1 工程概况

上述既有钢桁梁桥所处地区夏季气温较高,昼夜温差较大。桥梁采用的钢材等级为S355,桥梁总长320.0 m(170.0 m+150.0 m),净宽10.2 m,主塔高60.0 m,塔顶横梁宽11.4 m,塔底宽15.8 m。主塔塔座底部配有钢结构转盘,在船只通过时可进行逆时针平旋开启,保证船只正常通行。

经检验,该桥已不能满足现有交通负荷,桥梁各构件存在锈蚀损害,急需加固改造。现需对桥梁整体抬升25 cm,保证主塔底部转盘有足够的加固空间。全桥共计24个顶升位。桥梁整体侧面图如图1所示。



图1 某钢桁梁桥侧面图

Fig. 1 Side view of the steel truss bridge

2 顶升阶段施工监控实施

2.1 顶升阶段施工监控

在正式起顶时,需根据桥梁具体情况灵活调整顶升高度。该桥的顶升高度为25 cm,满足梁下更换支座的空间要求。

通过现场监测和监控计算等手段,对桥梁维修加固施工过程中的结构内力和位移进行监测、分析和预测^[6],提供桥梁施工控制信息,以保证整个结构的受力状态、线形在容许范围内,确保桥梁主结构的内力处于安全可控状态^[7]。测点监控内容见表1。

表1 测点监控内容

Table 1 Monitoring content of measuring points

阶段	应力监测		变形监测		监测时间
	内容	范围	内容	范围	
准备阶段	主梁应力	全部测点	变形、轴线偏位	全部测点	下午6点后
顶升阶段	主梁应力 (视情况确定)	全部测点	变形	全部测点	下午6点后

2.2 应变测点布置

为了确保桥梁在顶升过程中的结构安全,及时掌握结构的受力状态,需在合适的位置布设应变计。共布设了9个应变测点,其位置见表2。在顶升过程中,各测点均布设振弦式应变传感器(自带温度传感器)。

表2 应变测点布设位置

Table 2 Location of strain measuring points

测点	测点位置
一号	主塔塔底
二号	主塔1/2位置处
三号	右跨上弦杆1/8位置处
四号	左跨1/4位置处
五号	左跨上弦杆3/4位置处
六号	左跨下弦杆最大悬臂端
七号	右跨上弦杆1/2位置处
八号	右跨下弦杆最大悬臂处
九号	右跨上弦杆最大悬臂端

2.3 变形测点布置

桥梁结构变形监测以主梁线形监控为主。桥体纵向(顺桥向)变形测点布置如图2所示。

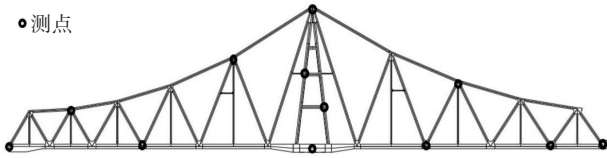


图2 桥体纵向(顺桥向)变形测点布置

Fig. 2 Layout of longitudinal (along the bridge) deformation measuring points of the bridge

3 有限元模型

3.1 有限元模型建立

根据该桥的结构形式和受力特点,采用有限元软件建立桥梁模型。弹性模量的变化直接影响桥梁刚度的变化,本文将钢材(S355)的弹性模量分别折减10%、15%、20%后作为刚度参数,以分析在加固顶升过程中桥梁应力、变形的变化情况^[8]。

桥梁主结构钢材为S355级钢材,密度为7 850 kg/m³,弹性模量为2.1×10¹¹ Pa,泊松比为0.3,热膨胀系数为1.2×10⁻⁵ °C⁻¹。边界条件为:左右两跨为悬臂状态,主塔底部8个盆式固定支座均不得沿X、Y、Z方向平转。共计700个节点,1 052个单元。

由于每个节点的顶升力不同,所用千斤顶型号及布置位置也会不同。根据有限元模型在落架阶段反算出结构支座处的反力(即加固顶升阶段的顶升力)。千斤顶型号及布置位置见表3。

表3 千斤顶型号及布置位置

Table 3 Jack type and layout location

千斤顶型号	布置位置
800 t	轴205、轴215
500 t	轴200、轴220
400 t	轴160、轴180、轴240、轴260
300 t	轴120、轴140、轴280、轴300

在桥梁达到最佳应力线形后,按照反力同时顶升轴120~轴300的24个顶升节点,共顶升25 cm。然后,再更换主塔底部支座,对环梁及中心销进行加固。顶升点布置及顶升力大小如图3所示。

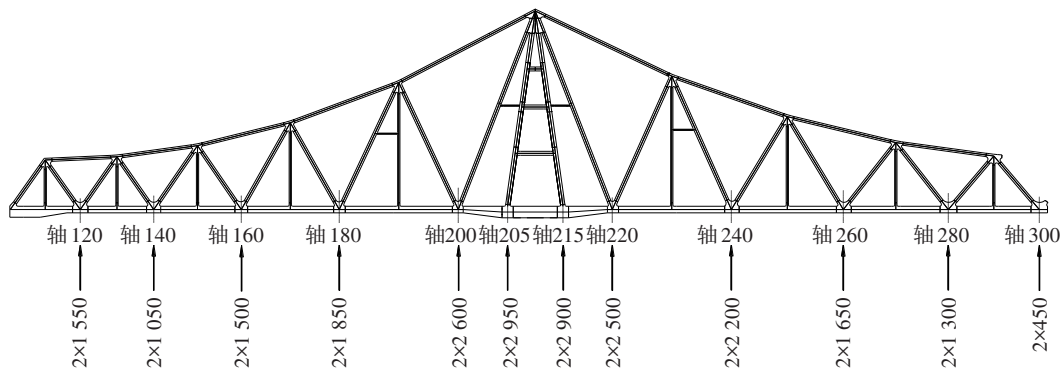


图3 顶升力测点布置图(单位:kN)

Fig. 3 Layout of jacking force measuring points (unit: kN)

3.2 模型计算结果及实测数据对比

将有限元模型计算结果与实测数据进行对比,以分析顶升过程中各构件的受力状况,指导现场顶升方案的确定及实施过程。顶升后模型应力如图4

所示。顶升后由有限元模型计算得到的理论变形如图5所示。理论变形与实测变形(均为桥梁顶升后的数据)的对比如图6所示。有限元模型及实测应力对比见表4。

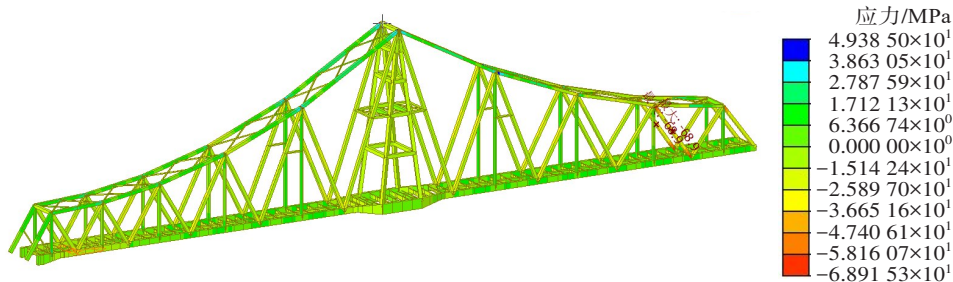


图4 顶升后模型应力图

Fig. 4 Model stress after jacking

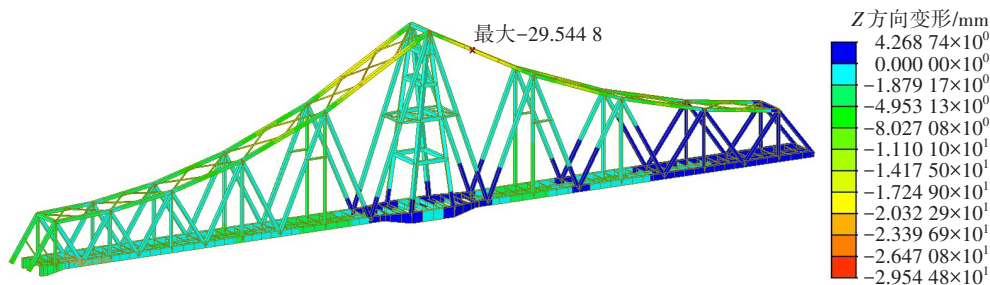


图5 顶升后模型变形图

Fig. 5 Model deformation diagram after jacking

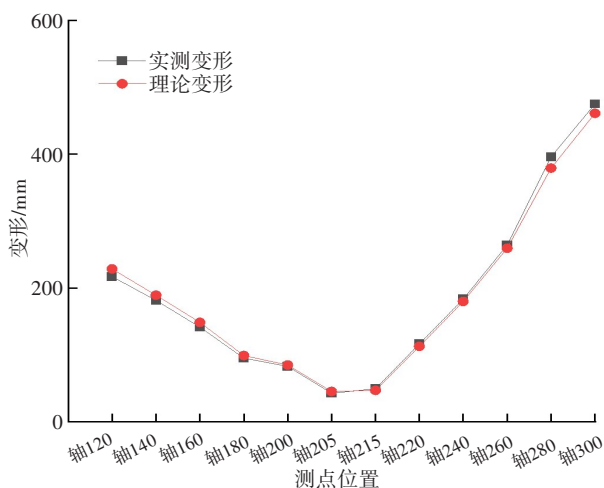


图6 实测变形与理论变形的对比

Fig. 6 Comparison between measured deformation and theoretical deformation

表4 模型应力与实测应力对比

Table 4 Comparison between model stress and measured stress

测点	实测应力相对值	理论应力相对值	差值(绝对值)
一号	57.5	68.0	10.5
二号	62.6	65.0	2.4
三号	-31.7	-45.2	13.5
四号	79.1	69.9	9.2
五号	-20.4	-22.5	2.1
六号	-13.6	-9.3	4.3
七号	-86.1	-105.4	19.3
八号	2.7	15.1	12.4
九号	-3.1	-10.0	6.9

注:实测应力相对值、理论应力相对值分别指实测应力、有限元模型计算结果中顶升前后的差值。

由图4可知,最大压应力出现在右跨斜杆处,大小为68.9 MPa。由表4可知,桥梁整体顶升后实测应力相对值与理论应力相对值多数比较接近,且实测变形与理论变形的变化趋势一致(图6),说明所建有限元模型可对该桥顶升施工起到预测作用。由图5可知,最大理论变形出现在右跨上弦杆位置,

最大变形值为29.5448 mm。

3.3 有限元模型验证结论

在顶升施工过程中实测数值与有限元模型计算值较为接近,因此该有限元模型可作为验证模型进行相关参数的分析。

1) 在钢桁梁桥顶升加固过程中,对桥梁进行有限元模拟分析尤为重要。可以分析钢桁梁桥施工过程中的各种荷载问题,并有针对性地提前做好规划,将桥面调整至合适的位置。

2) 对钢桁梁桥进行顶升加固时,使用整体顶升的施工方案是可行的,桥梁整体受力、变形均在合理范围内。

4 刚度参数影响分析

在桥梁施工以及成桥后的运营过程中,出于种种原因,桥梁结构的实际刚度比设计刚度要小。钢桁梁桥刚度折减主要包括以下几个原因:

1) 在钢结构材料运输过程中,材料外部容易被磨损;或施工过程中材料质量不佳、养护不当等导致主梁在几何特性上存在误差,进而使得桥梁结构在成桥时的实际刚度无法达到设计刚度。

2) 在桥梁运营期间,桥梁服役环境相对恶劣,桥梁结构出现一定程度的磨损、开裂及锈蚀,因而出现了刚度折减。

为了能综合研究上述因素影响下钢桁梁桥的结构变形问题,本文采用简化算法,通过调整钢材的弹性模量来模拟桥梁刚度的变化,以分析桥梁结构整体刚度折减对桥梁的影响。

4.1 弹性模量的影响

弹性模量的变化会直接影响桥梁主梁的刚度,从而影响主梁变形。前文验证了有限元模型的准确性,现根据文献[9]在整桥刚度参数按10%、15%、20%折减的情况下,计算桥梁的整体变形。折减后的弹性模量见表5。

表5 折减后的弹性模量
Table 5 Reduced elasticity modulus

折减工况	折减比例/%	弹性模量/(10 ¹¹ Pa)
GK1	10	1.89
GK2	15	1.76
GK3	20	1.68

4.2 刚度参数工况分析

为了分析刚度折减对桥梁变形的影响。折减工况 GK1 ~ GK3 的桥梁变形如图 7 ~ 9 所示。

从图 7 ~ 9 可以看出,当刚度折减 10%、15%、20% 后,桥梁最大变形值均出现在右跨上弦杆上,

最大变形值分别为 32.827 5、35.877 7、36.930 9 mm,方向均竖直向下。由此可见,随着刚度折减系数的变化,桥梁的最大变形位置并未改变,但是最大变形值随着刚度折减比例的增大而增大。各工况实际变形与验证模型的变形差值见表 6。

由表 6 可知,桥梁刚度折减越大,变形也越大;当刚度折减 10%、15%、20% 后,桥梁最大变形量分别增加了 12.5%、20.0%、25.3%。因此,刚度损失对桥梁变形有一定的影响,在桥梁施工及运营期间,对桥梁进行养护尤为重要。

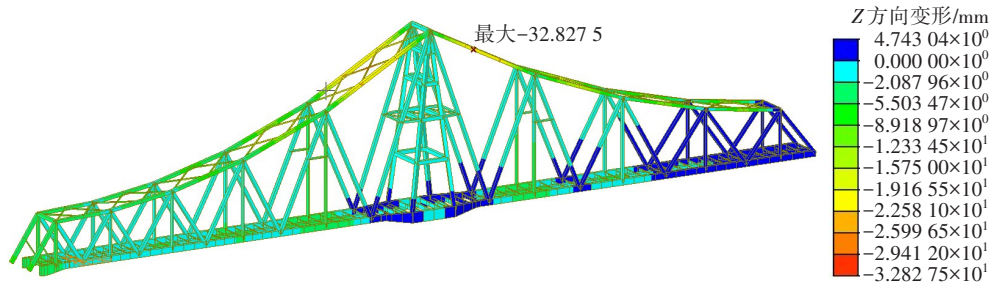


图7 GK1 桥梁变形图

Fig. 7 Deformation diagram of GK1

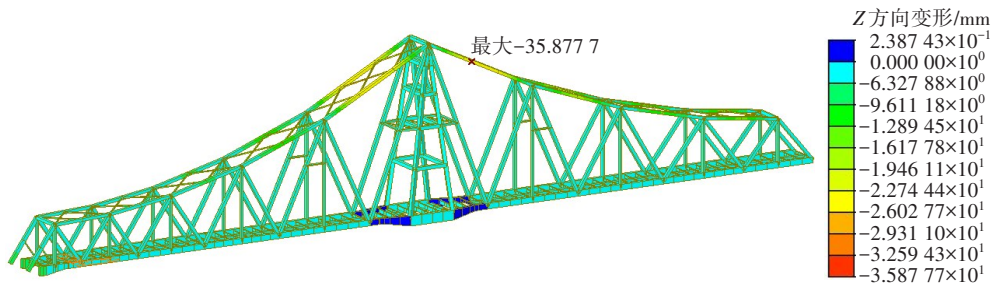


图8 GK2 桥梁变形图

Fig. 8 Deformation diagram of GK2

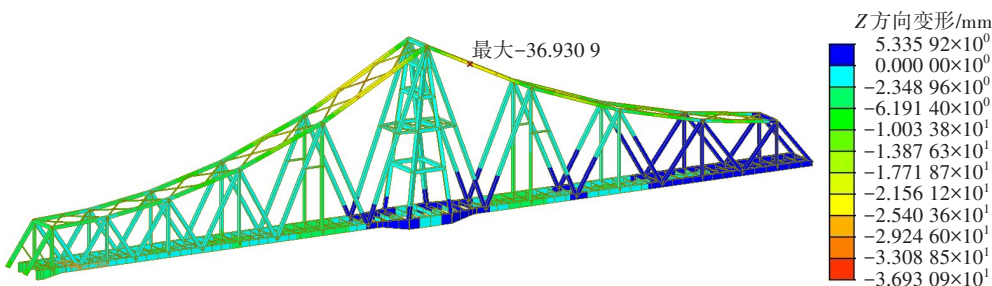


图9 GK3 桥梁变形图

Fig. 9 Deformation diagram of GK3

5 温度参数影响分析

该桥加固顶升阶段正值夏季,此时当地白天最高温度可达 39 °C,晚上最低温度 23 °C。该桥为钢桁梁桥,钢结构的导热性能好,且桥梁从顶升开始至顶

升结束,工作量大,时间长,顶升前后会有一定的气温变化。为了更好地模拟实际顶升情况,在有限元模型计算中设定顶升前后环境温差为 20 °C,以分析温度参数变化对桥梁顶升过程中结构变形的影响^[10-12]。计算结果如图 10 ~ 11 所示,温度参数影响对比分析见表 7。

表6 各工况下验证模型变形差值对比

Table 6 Comparison of deformation differences in validation model under various working conditions

测点位置	GK1		GK2		GK3	
	变形差值/mm	变形差值百分比/%	变形差值/mm	变形差值百分比/%	变形差值/mm	变形差值百分比/%
轴120	-0.02	10.9	-0.03	19.1	-0.04	25.1
轴140	-0.01	12.5	-0.01	20.0	-0.01	25.0
轴160	-0.02	11.2	-0.04	19.3	-0.05	25.1
轴180	-0.02	11.3	-0.04	19.6	-0.05	25.3
轴200	0.03	11.3	0.05	19.5	0.07	25.3
轴205	0.02	11.5	0.03	19.9	0.04	25.0
轴215	0.02	11.2	0.03	19.1	0.05	25.2
轴220	0.05	11.0	0.08	19.3	0.11	25.0
轴240	0.06	11.1	0.10	19.4	0.13	25.0
轴260	0.13	10.0	0.23	19.3	0.30	25.0
轴280	0.31	11.2	0.54	19.3	0.70	24.9
轴300	0.47	11.1	0.82	19.3	1.07	24.9

注:GK1变形差值是指刚度折减10%时,模型的变形值与原始模型变形值的差值;GK1变形差值百分比是指GK1变形差值占原始模型变形值的百分比。其他以此类推。

由图10~11可知,在20℃温差下,桥梁竖向最大变形出现在右跨上弦杆上,最大变形值为15.6751mm,方向竖直向下。桥梁纵向最大变形出现在悬臂端,其中左跨最大变形值为34.7210mm,方向为沿顺桥向向外;右跨最大变形值为35.1060mm,方

向为沿顺桥向向外。由此可见,在钢桁梁桥的加固顶升过程中,温差对桥梁变形有一定的影响,故选择在温度较低的夜间施工,将温差影响降至最低。

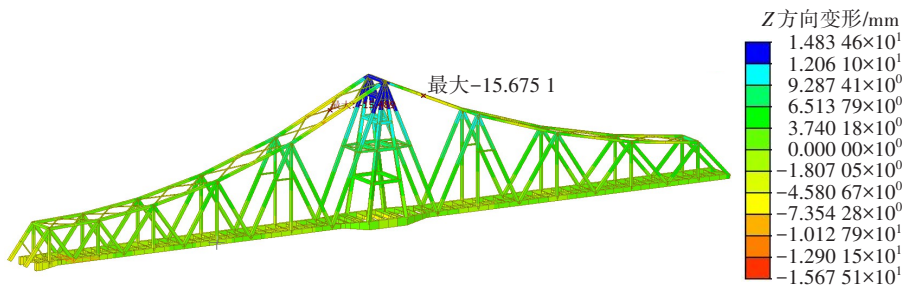


图10 温差20℃时竖向变形的模型计算结果

Fig. 10 Model calculation results of vertical deformation at a temperature difference of 20℃

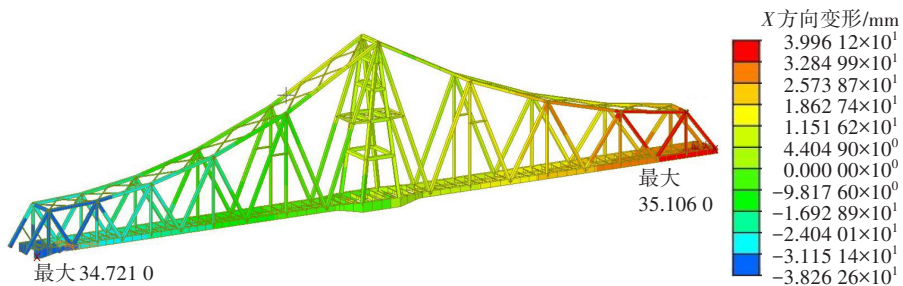


图11 温差20℃时纵向变形的模型计算结果

Fig. 11 Model calculation results of longitudinal deformation at a temperature difference of 20℃

表7 温度参数对模型计算结果的影响

Table 7 Influence of temperature parameter on model calculation results

mm

测点位置	竖向变形量			纵向变形量		
	原始模型	20 °C温差模型	差值	原始模型	20 °C温差模型	差值
轴 120	-0.15	-0.11	0.04	-0.42	-30.94	-30.52
轴 140	-0.04	0.41	0.45	-0.54	-26.03	-25.49
轴 160	-0.19	0.76	0.95	-0.42	-19.91	-19.49
轴 180	-0.20	1.30	1.50	-0.22	-12.99	-12.77
轴 200	0.26	2.44	2.18	-0.01	-4.62	-4.61
轴 205	0.16	1.42	1.26	-0.01	-0.95	-0.94
轴 215	0.18	1.44	1.26	0.01	0.94	0.93
轴 220	0.42	2.61	2.19	0.01	4.62	4.61
轴 240	0.52	2.06	1.54	0.24	13.01	12.77
轴 260	1.18	2.12	0.94	0.58	21.03	20.45
轴 280	2.79	3.16	0.37	0.98	28.63	27.65
轴 300	4.27	4.15	-0.12	1.22	35.11	33.89

6 结论

本文结合既有钢桁梁桥实例,建立有限元模型,对加固顶升阶段的桥梁进行整体受力分析,得出以下结论:

1) 在钢桁梁桥顶升加固过程中,对桥梁进行有限元模拟分析尤为重要。通过分析钢桁梁桥施工过程中的结构受力特征及变形,对桥梁提前做好规划。

2) 在加固顶升过程中,整桥刚度折减对桥梁变形较为敏感。当整桥刚度分别折减10%、15%、20%时,桥梁最大变形量分别增加了12.5%、20.0%、25.3%。在桥梁成桥运营期间,应进行定期养护及检查,避免出现太大的刚度损失。

3) 温差对大跨度钢桁梁桥加固顶升过程中的结构变形影响较大,其中悬臂端的变形值最大。因此,此类桥梁应选择温度较低的夜间进行加固顶升施工,以减小温差引起的变形。

参考文献(References):

- [1] 章俊, 罗美侨. 同步顶升更换支座技术在桥梁维修加固中的应用[J]. 交通世界, 2021(16): 109-110.
ZHANG Jun, LUO Meiqiao. Application of technology of synchronous lifting and replacement of bearings in bridge maintenance and reinforcement [J]. Transworld, 2021(16): 109-110.
- [2] 彭超恒. 基于MIDAS的桥梁安全检测评估[J]. 建设科技, 2021(12): 83-86. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2021.12.018.
PENG Chaoheng. Safety detection and evaluation of bridge based on MIDAS [J]. Construction Science and

Technology, 2021(12): 83-86. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2021.12.018.

- [3] 叶见曙, 张峰. 预应力混凝土连续箱梁开裂后的刚度退化模型[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 67-72. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7372.2007.06.012.
YE Jianshu, ZHANG Feng. Stiffness degeneration model of prestressed concrete continuous box girder after cracking [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 67-72. DOI: 10.3321/j.issn: 1001-7372.2007.06.012.
- [4] 曾志平, 陈秀方, 赵国藩. 温度荷载作用下大跨度桥梁与无砟道岔相互作用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(4): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2007.04.003.
ZENG Zhiping, CHEN Xiufang, ZHAO Guofan. Study on the interaction between long span bridge and ballastless turnout under temperature force [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(4): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7029.2007.04.003.
- [5] 白应华, 孙振笏, 熊阳. 湖滨东路跨线桥顶升工程施工监控有限元分析[J]. 湖北工业大学学报, 2016, 31(1): 101-103, 120. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4684.2016.01.026.
BAI Yinghua, SUN Zhenhu, XIONG Yang. Finite element analysis of lift-up construction monitoring for Hubin East Road flyover of Xiamen City [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2016, 31(1): 101-103, 120. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4684.2016.01.026.
- [6] 陈才, 路鑫. 连续刚构桥悬臂施工阶段预拱度曲线拟合研究 [J]. 公路与汽运, 2023(5): 120-123. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.026.
CHEN Cai, LU Xin. Study on pre-camber curve fitting of continuous rigid frame bridge in cantilever construction stage [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(5): 120-123. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.026.
- [7] 付向荣. 独柱墩桥梁抗倾覆加固及同步顶升更换支座 (下转第44页)

- [19] 崔潮, 彭晖, 刘扬, 等. 矿渣掺量及激发剂模数对偏高岭土基地聚物常温固化的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
CUI Chao, PENG Hui, LIU Yang, et al. Influence of GGBFS content and activator modulus on curing of metakaolin based geopolymer at ambient temperature[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4): 535-542. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2017.04.008.
- [20] 刘进琪, 王世玉, 彭晖, 等. 碱激发剂对粉煤灰基地聚物性能影响研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.
LIU Jinqi, WANG Shiyu, PENG Hui, et al. Study on the effect of alkali activator on the properties of fly ash-based geopolymer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 8-13. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.002.
- [21] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 246-252. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.10.
CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 246-252. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.10.
- [22] 刘龙武, 周斌, 宁泽宇. 吹填泥浆快速处理方法的室内试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.019.
LIU Longwu, ZHOU Bin, NING Zeyu. Experimental study on rapid treatment method for dredged slurry [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(4): 16-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.04.019.
- [23] 吕小武, 赵永伟, 闫永亮. 石灰石粉对水泥砂浆强度影响及作用机理[J]. 中外公路, 2022, 42(3): 167-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.030.
LYU Xiaowu, ZHAO Yongwei, YAN Yongliang. Effect of limestone powder on strength of cement mortar and its mechanism [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 167-173. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2022.03.030.

(责任编辑:薛仪)

(上接第7页)

- 技术[J]. 上海公路, 2020(2): 30-34, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2020.02.009.
FU Xiangrong. Anti-overturning reinforcement and synchronous jacking replacement technology of single pier bridge [J]. Shanghai Highways, 2020(2): 30-34, 53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2020.02.009.
- [8] 刘毅, 刘年朋, 卓子, 等. 考虑刚度折减的弹性二阶分析法在双跨排架结构中的运用[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(9): 1-7. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.001.
LIU Yi, LIU Nianpeng, ZHUO Zi, et al. The application of elastic second-order method with considering stiffness reduction to two-span bent structure [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(9): 1-7. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2017.09.001.
- [9] 邓继华, 许斌林, 黄学文, 等. 大跨径体内混合配束连续刚构桥有限元分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 51-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.008.
DENG Jihua, XU Binlin, HUANG Xuewen, et al. Finite element analysis for long-span concrete continuous rigid frame bridge with mixed arrangement of internal and external tendons [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 51-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.01.008.
- [10] 刘宇飞, 李传习, 于孟生, 等. 大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.01.011.
LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2020.01.011.
- [11] 周帅, 于鹏, 聂建国, 等. 群钉连接组合轨道梁刚度调整系数研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(1): 1-7, 36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.002.
ZHOU Shuai, YU Peng, NIE Jianguo, et al. Study on stiffness adjustment coefficient of assembled composite track beam connected by group nails [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(1): 1-7, 36. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.01.002.
- [12] 唐利科, 宋随弟, 张扬. 大跨连续刚构桥桥墩计算长度系数的取值研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 190-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.04.022.
TANG Like, SONG Suidi, ZHANG Yang. Value of effective length coefficient of pier of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 190-196. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2024.04.022.

(责任编辑:石月珍)