

文章编号:1673-9469(2025)04-0049-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.007

大跨预应力混凝土连续梁桥单墩顶升技术研究

艾庆华,马文芳,胡佳欢,严鑫

(石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要:以某预应力混凝土连续梁桥震后修复工程为例,运用 Midas Civil 软件建立该桥的有限元模型,分别对单墩顶升、单墩顶升+移动荷载、单墩顶升+梯度升温等三种工况进行分析,研究了支座反力、梁体上下缘应力及预应力钢筋应力的变化规律。研究表明:当桥台处顶升时,相隔墩处主梁上顶板预应力钢筋首先发生断裂;当桥墩处顶升时,千斤顶所对应主梁截面顶板上缘混凝土出现拉裂破坏现象;当顶升高度达到支座更换要求时,在桥台处顶升须对过往车辆实施限行措施,在桥墩处顶升应中断交通;梯度升温对各支座反力、梁体下翼缘应力及预应力钢筋应力产生影响较小,上翼缘应力影响较大,但顶升点处梁体上翼缘由拉应力变压应力,对顶升施工具有一定的积极影响。

关键词:大跨度预应力混凝土连续梁桥;桥梁顶升;有限元分析

中图分类号:U445.4

文献标识码:A

Research on Single Pier Jacking Technology for Large-Span Prestressed Concrete Continuous Beam Bridges

AI Qinghua, MA Wenfang, HU Jiahuan, YAN Xin

(State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Taking the post earthquake repair project of a prestressed concrete continuous beam bridge as an example, a finite element model of the bridge was established using Midas Civil software. Three working conditions were analyzed, including single pier uplift, single pier uplift+moving load, and single pier uplift+gradient heating. The variation laws of support reaction force, upper and lower edge stress of the beam, and stress of prestressed steel bars were studied. Research has shown that when the bridge pier is lifted, the prestressed steel bars on the top plate of the main beam at the separated pier first break. When the bridge pier is lifted, the concrete on the top edge of the main beam section corresponding to the jack experiences tensile cracking and damage. When the lifting height reaches the requirement for bearing replacement, traffic restrictions must be implemented for passing vehicles when lifting at the bridge pier, and traffic should be interrupted when lifting at the bridge pier. The gradient heating has a relatively small impact on the reaction force of each support, the stress of the lower flange of the beam, and the stress of the prestressed steel bars, while the stress of the upper flange has a greater impact. However, the tensile stress and compressive stress of the upper flange of the beam at the jacking point have a certain positive impact on the jacking construction.

Key words: large-span prestressed concrete continuous beam bridge; bridge jacking; finite element analysis

收稿日期:2024-01-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600605,2021YFB2600600);河北省重点研发计划项目(22346101D)

第一作者:艾庆华(1977—),男,山东夏津人,博士,副教授,主要从事桥梁抗震与加固研究工作。

地震会使桥梁结构产生不同程度损伤, 支座作为桥梁结构的易损构件, 在历次地震中, 支座破坏现象尤为常见。大跨度钢筋混凝土连续箱梁桥具有上部结构重量大的特点, 合理的主梁顶升方案, 对于震后桥梁支座快速修复、确保结构施工安全及降低施工成本等均具有重要意义^[1-4]。随着液压技术的不断发展, 可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 同步顶升技术在桥梁顶升工程中得到应用。PLC 同步顶升技术采用力与位移双闭环控制方式, 通过调节供电频率来改变电机转速, 使油泵的流量连续可调, 从而实现各千斤顶同步顶升的目的^[5-9]。2003年, PLC 同步顶升技术首次应用于天津狮子林桥整体抬升, 抬升高度为 1.271 m^[10]。近年, PLC 同步顶升技术在桥梁支座更换等维护工程中也得到更为广泛的应用^[11]。国内学者针对桥梁顶升技术做了大量研究, 陈梁等^[12]对顶升过程开展有限元分析, 为桥梁顶升施工监控过程中各参数控制提供了理论依据。孙明德等^[13]分析了铁路连续梁桥的支座变形原因, 提出单墩顶升方法进行支座更换, 并通过数值模拟分别计算在有二期恒载作用下不同顶升位移梁体的应力变化, 确定了安全顶升高度。石华军^[14]采用 Midas Civil 模拟济南工业北路高架桥桥梁顶升施工过程, 对比单墩顶升和双墩顶升两种方案。结果表明, 两种方式均可保障桥梁顶升安全, 但单墩顶升更具经济性和实用性。

本文以国外某大跨径预应力混凝土连续梁桥为研究对象, 且中墩处千斤顶布置不同于以往直接安放在支座处的做法。对于预应力桥梁, 需确保主梁内部预应力钢筋处于容许拉应力安全范围内。在荷载工况中, 不仅考虑恒载作用, 还分别考虑限行但不中断交通以及太阳辐射作用下顶升施工对梁体安全性能的影响, 这些都是桥梁顶升施工过程中需重点考虑的问题。

1 桥梁概况

本桥主梁采用 (45.5+140+45.5) m 三跨预应力混凝土连续箱梁结构, 桥面宽度为 11.6 m, 混

凝土强度等级为 C55。中墩采用 8.5 m×3.0 m 的矩形混凝土实体墩, 墩高 3.5 m。桥台采用耳墙式桥台, 桥墩和桥台下采用直径为 $\Phi 1.5$ m 钻孔桩基础, 如图 1 所示。

该桥共布设有 8 个支座, 其中固定支座位于 3#墩, 1#、4#台处各支座承载力为 3 500 kN, 2#、3#墩处各支座承载力为 30 000 kN。2021 年 11 月 28 日该地发生 7.5 级地震, 造成该桥出现支座和垫石损坏、主梁整体偏移等问题。由于该桥处于地震多发区, 对其及时修复将有助于快速恢复当地的生产、生活秩序, 避免再次发生地震时引发更严重的桥梁损伤。

2 千斤顶的布置

在顶升过程中, 确保箱梁控制截面的应力符合相关规范要求是顶升方案能够安全实施的保障。同时, 千斤顶的合理布置及其顶升力大小的控制也是实现同步顶升的关键^[15]。根据我国《桥梁顶升移位改造技术规范》(GBT 51256—2017) 规定^[16], 千斤顶顶升点的布置宜以支座中心对称设置, 且千斤顶的数量可按式(1)估算。

$$n = k \frac{G_k}{N} \quad (1)$$

式中: n —千斤顶数量; G_k —顶升时桥梁总荷载标准值, kN; N —单个千斤顶额定承载力, kN; k —安全系数, 取值不小于 1.5, 水平承载时不小于 1.25。

该桥 1#、4#台恒载支座反力共计约 4 150 kN, 每个桥台处需布置 4 台 1 500 kN 千斤顶; 2#、3#墩恒载支座反力共计约 56 000 kN, 需布置 8 台 11 000 kN 千斤顶。由于墩顶空间受限, 故在中墩两侧各设置 4 个混凝土临时支墩作为千斤顶的反力支撑, 如图 2、图 3 所示。

3 建立有限元模型

根据设计文件和施工日志, 使用 Midas Civil 软件建立桥梁施工阶段和成桥状态有限元模型, 如图 4 所示。

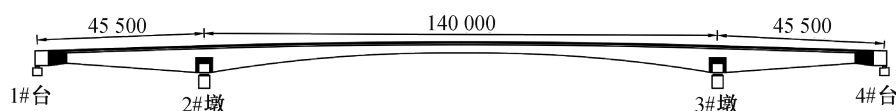


图 1 桥梁结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Beam elevation diagram (unit:mm)

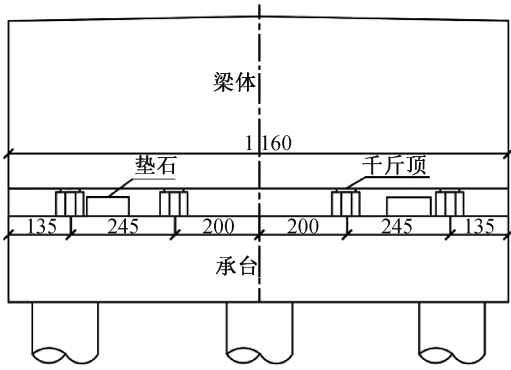


图2 桥台顶升横断面布置图(单位:cm)

Fig. 2 Bridge pier jacking cross-section diagram(unit:cm)

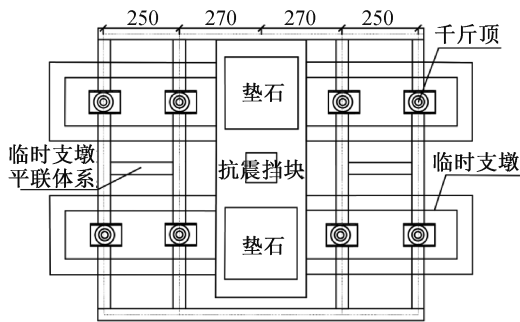


图3 桥墩顶升俯视布置图(单位:cm)

Fig. 3 Bridge pier jacking plan view diagram(unit:cm)

箱梁的边界条件按实际支座约束施加于中墩及桥台底面节点,底面节点与主梁节点进行弹性连接。在模型建立过程中,为了更好地模拟各千斤顶的同步顶升工作,在桥梁墩台相应的千斤顶支撑位置处建立相应节点来代表千斤顶:1#、4#台各建立4个节点,2#、3#墩处各建立8个节点。将这些千斤顶节点与其对应的梁体主节点进行弹性连接,选择弹性连接中的刚性,可最大程度地还原真实顶升状态下的边界条件。

在模型中采用节点力的方式模拟千斤顶顶升,确保顶升桥墩或台下各个千斤顶出力一致。当顶升力加载至顶升墩或台下处支座反力为0时,完成由支座到千斤顶支撑的转换。之后钝化顶升处支座边界条件,通过增加顶升力实现相应的顶升位移。

4 顶升计算分析

计算时分别考虑了顶升作用、顶升+移动荷载作用和顶升+梯度升温三种荷载工况,并验算各支座反力,梁体上、下翼缘应力以及预应力钢筋应力等参数是否在安全范围内,以确定单墩顶升时的最不利因素,进而在施工过程中针对其进行重点监控^[17],确保施工安全。

4.1 单墩顶升计算分析

单墩顶升分为桥台顶升和桥墩顶升两种情况,经计算,确定单独顶升1#台和单独顶升2#墩时,各千斤顶顶升力与支座处位移的关系。按照每10 mm一级将1#台和2#墩分别顶升至70 mm,并分析各墩支座反力、梁体翼缘应力及预应力钢筋应力等参数变化规律,验算各参数安全性。

4.1.1 各支座反力验算

对1#台和2#墩分别进行单墩顶升,随顶升位移增加其余各支座反力均呈线性变化,具体数据如下:每当1#台处位移上升10 mm,2#墩各支座反力减少119 kN,3#墩各支座反力增加97 kN,4#台各支座反力减少56 kN;每当2#桥墩处位移上升10 mm,1#台各支座反力减少122 kN,3#墩各支座反力减少162 kN,4#台各支座反力增加93.6 kN,如表1、表2所示。

单墩顶升时,其相邻墩、台处支座反力呈线性减小,其相隔墩、台处支座反力呈线性增加,在满足支座更换要求高度(桥台10 mm,中墩15 mm)内,各支座反力均未超出其承载能力。

4.1.2 梁体边缘混凝土应力验算

该桥主梁采用C55混凝土,其结构在弯曲受压及偏心受压时容许压应力为18.5 MPa,有箍筋和斜筋时容许主拉应力为2.97 MPa。分别计算1#台和2#墩在顶升10、40、70 mm高度下,全桥梁体上、下翼缘应力变化情况,如图5、图6所示。

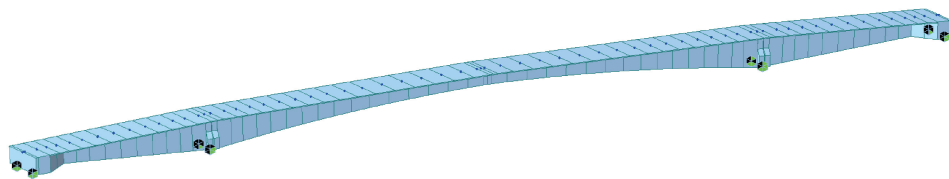


图4 梁体有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the beam

表 1 1#台位移与各支座反力关系

1#台位移 /mm	2#支座反力 /kN	3#支座反力 /kN	4#支座反力 /kN
0	28 209	28 209	1 952
10	28 090	28 306	1 896
20	27 971	28 403	1 840
30	27 852	28 500	1 784
40	27 733	28 597	1 728
50	27 614	28 694	1 672
60	27 495	28 791	1 616
70	27 376	28 888	1 560

表 2 2#墩位移与各支座反力关系

2#台位移 /mm	1#支座反力 /kN	3#支座反力 /kN	4#支座反力 /kN
0	1 921.5	28 172.5	1 972.5
10	1 799.5	28 010.5	2 066.1
20	1 677.5	27 848.5	2 159.7
30	1 555.5	17 686.5	2 253.3
40	1 433.5	27 524.5	2 346.9
50	1 311.5	27 362.5	2 440.5
60	1 189.5	27 200.5	2 534.1
70	1 067.5	27 038.5	2 627.7

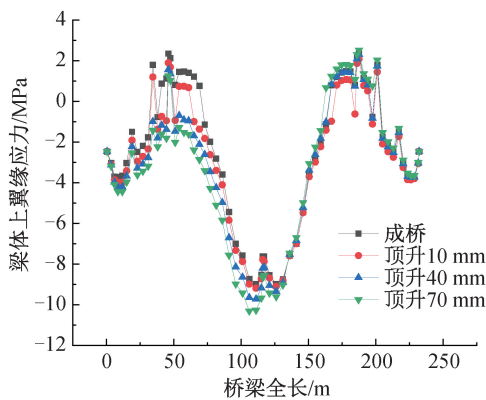


图 5 顶升 1#台梁体上翼缘应力

Fig. 5 Top flange stress of the girder at Abutment #1 during jacking

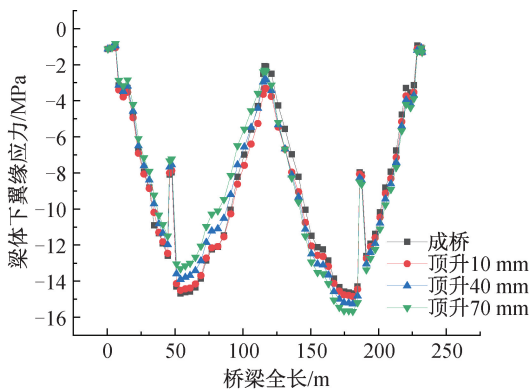


图 6 顶升 1#台梁体下翼缘应力

Fig. 6 Bottom flange stress of the girder at Abutment #1 during jacking

由图 5、图 6 可知,在单独顶升 1#桥台的工况下,跨中靠左半幅桥梁体上翼缘压应力随顶升位移升高而增大,靠近 2#墩处上翼缘拉应力先减小,后由拉应力变为压应力并增大,跨中靠右侧梁体上翼缘应力变化较小;而 2#墩至跨中一段,梁体下翼缘压应力随顶升位移增加而减小,且变化较明显。

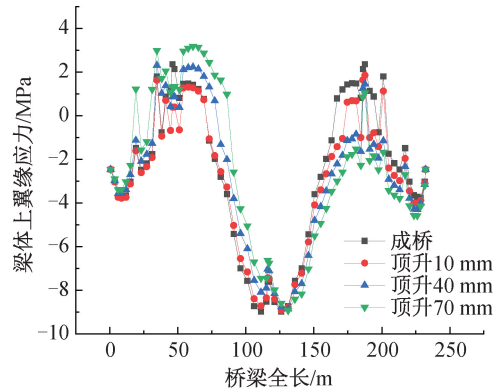


图 7 顶升 2#墩梁体上翼缘应力

Fig. 7 Top flange stress of the Pier #2 girder during jacking

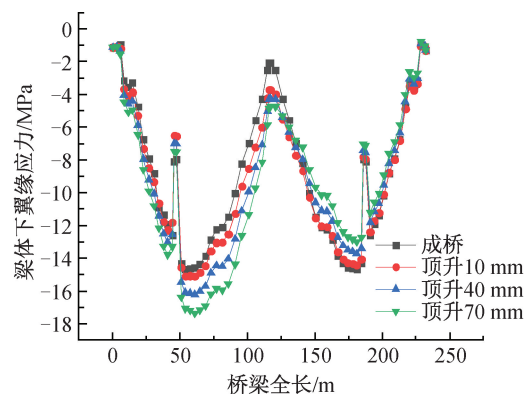


图 8 顶升 2#墩梁体下翼缘应力

Fig. 8 Bottom flange stress of the Pier #2 girder during jacking

由图 7、图 8 可知,单独顶升 2#桥墩时,2#墩各千斤顶位置处的梁体上翼缘拉应力和跨中靠右侧半幅桥的上翼缘压应力随顶升位移增大而增大。同时,2#墩至跨中段的上翼缘压应力和 3#墩对应位置处的梁体上翼缘拉应力则随顶升位移增加而减小;左半幅桥梁体下缘的压应力随顶升位移增加而增大,且在 2#墩至跨中段处较明显,而跨中至右半幅桥下翼缘压应力随顶升位移增加而减小。

4.1.3 预应力钢筋应力验算

由于本桥为三跨预应力混凝土连续梁桥,在顶升过程中,需要对梁体内部的预应力钢筋应力进行验算。顶升时,上顶板局部会出现拉应力增

大的情况。此时,位于顶板内预应力钢筋也会随之受到拉力作用。当应力超过容许拉应力时,会导致预应力钢筋失效。因此,我们需要关注上顶板处关键位置处的预应力钢筋应力变化。2#墩处对应梁体上顶板布置的 T4、T9、T12、T16 号预应力钢筋布置图如图 9 所示。与之对称,3#墩处梁体上顶板中布置有 T4'、T9'、T12'、T16'号预应力钢筋。

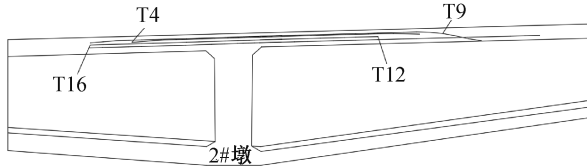


图 9 2#墩处顶板预应力钢筋布置图

Fig. 9 Variation in prestressing tendon stress at Pier #2 during jacking

验算过程中,预应力钢筋应力为扣除全部预应力损失并考虑了顶升作用引起的预应力钢筋应力变化的结果。图 10—图 11 分别为单独顶升 1#台和 2#墩时各关键位置处预应力钢筋的拉应力变化。

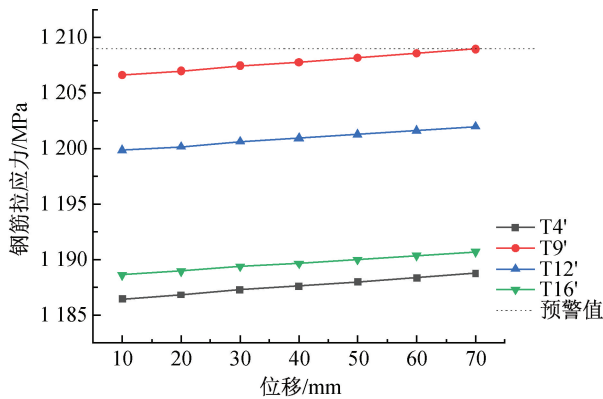


图 10 1#台顶升预应力钢筋应力变化

Fig. 10 Variation in prestressing tendon stress at Abutment #1 during jacking

结果表明,随单墩顶升位移的增加,各预应力钢筋拉应力均呈线性增加趋势。具体而言,随着 1#台顶升位移增加,位于 3#墩对应梁体顶板位置处的 T9'号预应力钢筋应力增速较快,且更接近钢筋容许拉应力值 1 029 MPa;而当 2#墩进行顶升时,位于 2#墩处顶板中各预应力钢筋拉应力距容许应力值相差甚远。

因此,在满足支座更换高度要求下进行单墩顶升时,各支座承载力均安全。进行 1#桥台顶升时,应以保证预应力钢筋的应力安全为控制目标。且需对 3#墩处对应梁体进行应力监控,而 2#桥墩

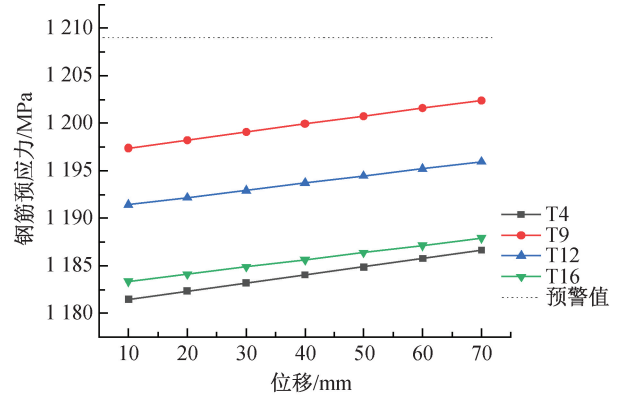


图 11 2#墩顶升预应力钢筋应力变化

Fig. 11 Variation in prestressing tendon stress at Pier #2 during jacking

顶升时,应该重点监测桥墩靠跨中一侧千斤顶处所对应的梁体上翼缘拉应力是否安全,并观测其边缘混凝土是否有开裂情况。

4.2 不中断交通情况下单墩顶升分析

为了保证桥梁支座更换时尽量不影响车辆通行,有必要考虑限行但不中断交通情况下顶升对桥梁应力的影响。本桥为双车道行驶,设计考虑通行特种车辆及运输大型设备的需要,采用以下 56 t 级车辆荷载按照双车道各布置一辆车进行检算(图 12)。

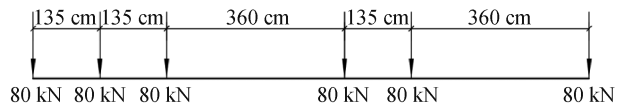


图 12 56 t 级车辆荷载图

Fig. 12 Load diagram for a 56 t vehicle

汽车荷载的冲击系数取车道的冲击系数,按规范取纵向计算冲击系数 $\mu_1 = 0.05$,横向计算冲击系数 $\mu_2 = 0.3$ 。为确保不中断交通情况下桥梁顶升施工主梁安全,需对本桥实施限行措施,将两侧双车道改为中间单车道通行,并将控制目标设定为:单墩顶升时产生的应力与单车道车辆荷载产生的应力之和小于桥梁原双车道行车汽车荷载应力。同时,进行支座反力及预应力钢筋应力验算。为满足支座更换要求,1#台支座处需顶升 10 mm,2#墩支座处需顶升 15 mm,所列工况如下,工况 1:成桥状态+双车道移动荷载;工况 2:1#台顶升 10 mm+单车道移动荷载;工况 3:2#墩顶升 15 mm+单车道移动荷载。

经计算,在工况 2 下,3#墩处支座反力为 28 549.9 kN;T9'号预应力钢筋应力为 1 205.9 MPa;

工况3下,4#墩处支座反力为2 331.8 kN。各工况下支座反力与预应力钢筋应力均在安全范围内。梁体上、下翼缘应力对比如图13、图14所示。

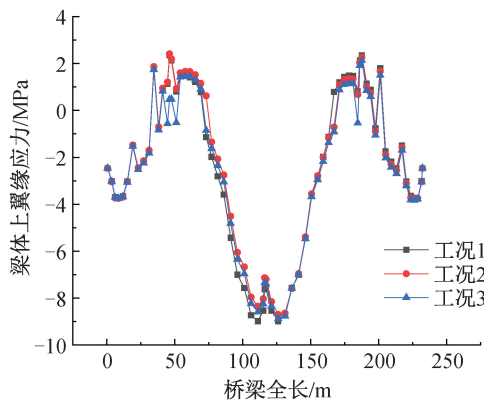


图13 梁体上翼缘应力对比图

Fig. 13 Comparison diagram of upper flange stress

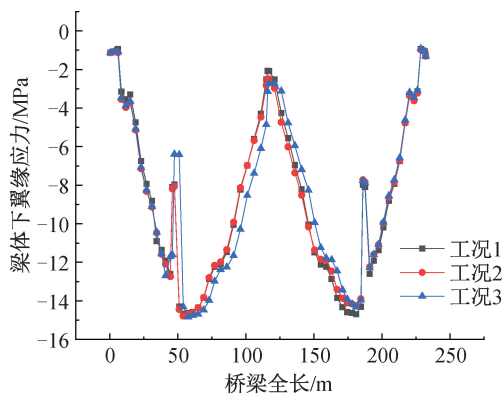


图14 梁体下翼缘应力对比图

Fig. 14 Comparison diagram of lower flange stress

由对比结果可知,若将原双车道限行变为单车道行驶,进行单墩顶升时桥梁上翼缘应力均小于成桥状态下原双车道行驶设计值,而梁体下翼缘应力图中2#墩靠近跨中侧出现工况3压应力超过工况1压应力的情况,不符合梁体应力控制目标。这是因为单独顶升桥墩时,应尽量选择在中断交通最少时进行中断交通处理,而单独顶升桥台时可以进行限行但不中断交通处理。

4.3 日照作用对单墩顶升的影响

在有限元模拟中,日照作用下桥面温度梯度升温温差按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362—2018)取值^[18]。考虑桥面100 mm厚沥青混凝土铺装层, $T_1 = +14\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = +5.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。并分别模拟1#台顶升10 mm和2#墩顶升15 mm的工况,验算各支座反力、预应力钢筋应力及梁体上、下翼缘应力变化。

经验算,梯度升温下顶升1#台10 mm时,2#墩、3#墩处支座反力分别为27 996 kN和28 213.1 kN。相比于单墩顶升时支座反力分别减少了95 kN和92.9 kN,而4#台支座反力为1 991.8 kN,增加了95.8 kN,T9号预应力钢筋应力为1 206.9 MPa,较单墩顶升时增加了0.3 MPa;梯度升温下顶升2#墩15 mm,1#、4#台处支座反力分别为1 738.5 kN和2 115.9 kN,相比于单墩顶升时增加了0.9 kN和3 kN,3#墩处支座反力分别为27 923.5 kN,减少了6 kN,而T9号预应力钢筋应力为1 197.65 MPa,较单墩顶升时增加了0.17 MPa。在满足支座更换高度要求下,支座反力与预应力钢筋应力变化较小且均在安全范围内。梁体应力变化如图15—图18所示。

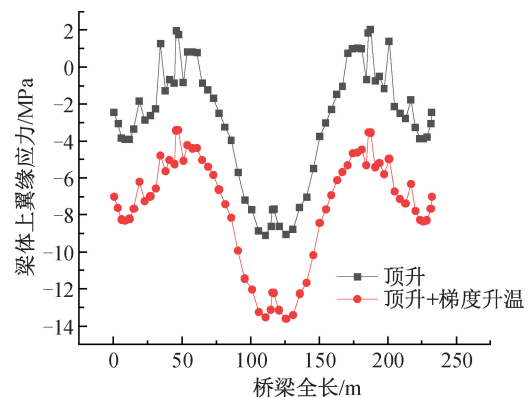


图15 顶升1#台梁体上翼缘应力图

Fig. 15 Diagram of top flange stress of the girder at Abutment #1 during jacking

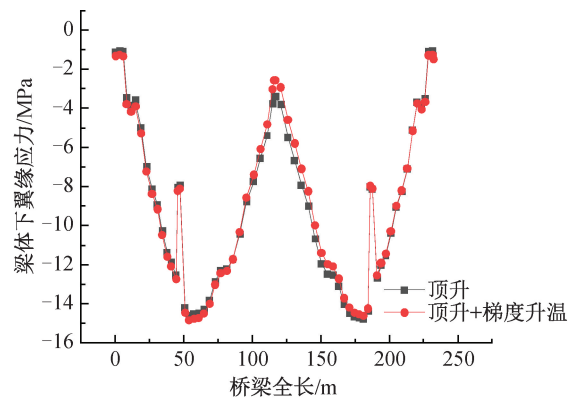


图16 顶升1#台梁体下翼缘应力图

Fig. 16 Diagram of bottom flange stress of the girder at Abutment #1 during jacking

由图15—图18可知,梯度升温作用对梁体上翼缘应力影响较大,下翼缘应力影响较小。在梯度升温作用下,顶升1#台时,梁体上翼缘应力最大变化量为6.37 MPa。顶升2#墩时,上翼缘应力最

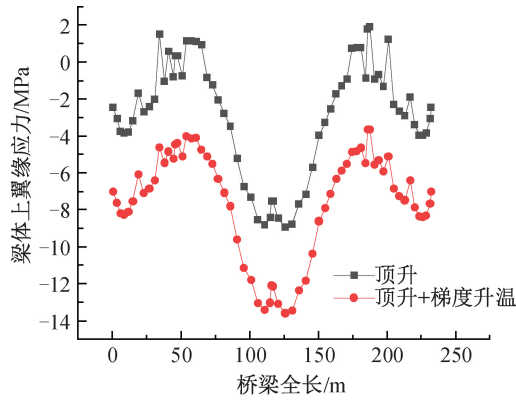


图 17 顶升 2#墩梁体上翼缘应力图

Fig. 17 Diagram of top flange stress of the Pier #2 girder during jacking

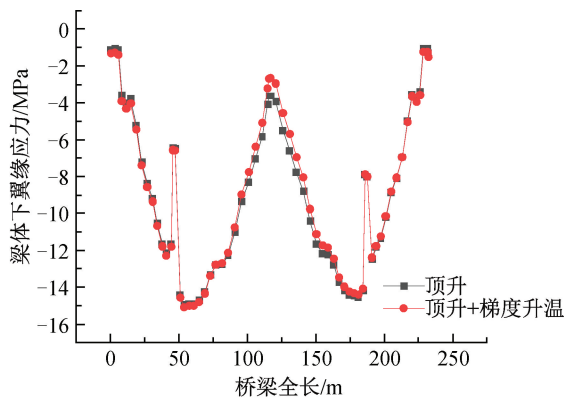


图 18 顶升 2#墩梁体下翼缘应力图

Fig. 18 Diagram of bottom flange stress of the Pier #2 girder during jacking

大变化量为 6.33 MPa。顶升施工时会使各千斤顶处梁体上翼缘产生拉应力。而日照作用下,梯度升温使梁体上翼缘压应力增大,导致千斤顶顶升位置处梁体上翼缘应力由拉应力变为压应力,减少混凝土受拉开裂的情况,对顶升施工具有一定的有利影响。

5 结论

本文以某既有大跨预应力混凝土连续梁桥震后修复工程为例,通过数值模拟得到单墩顶升时桥梁各支座反力、梁体上下翼缘应力以及预应力钢筋应力的变化规律,及不中断交通和日照作用对桥梁顶升的影响,所得结论如下:

1) 当桥台处进行顶升时,相隔墩处主梁上顶板预应力钢筋首先发生断裂;当桥墩处顶升时,千斤顶所对应主梁截面顶板上缘混凝土发生拉裂破坏,故顶升施工时应加强该部位的监控。

2) 当顶升高度满足支座更换要求的高度时,

在桥台处顶升时须对车辆进行限行;在桥墩处顶升时应中断交通。

3) 梯度升温会导致顶升点处梁体上翼缘应力由拉应力变为压应力,对顶升施工具有一定的有利影响,而对各支座反力、梁体下翼缘应力及预应力钢筋应力产生影响较小。

参考文献:

- [1] 宋显锐,魏莹莹,方磊磊,等. 大跨钢箱梁桥顶推临时支架结构受力分析[J]. 结构工程师, 2023, 39(5): 17-24.
SONG X R, WEI Y Y, FANG L L, et al. Analysis of the support structure in the launching construction of large-span steel box girder bridge [J]. Structural Engineers, 2023, 39(5): 17-24.
- [2] QIN L I, GAO J, ZHANG Q. Simulation and application of a new type of slideway beam based on MIDAS jacking construction method [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 729(1): 012106.
- [3] LI F Y, WU P F, YAN X F. Analysis and monitoring on jacking construction of continuous box girder bridge [J]. Computers and Concrete, 2015, 16(1): 49-65.
- [4] 尹天军. 塔梁墩固结体系斜拉桥整体顶升关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(2): 104-109.
YIN T J. Key integral jack-up technique for cable-stayed bridge with fixed pylon-girder-pier system [J]. Bridge Construction, 2020, 50(2): 104-109.
- [5] 殷虹,李日益. GJDK-1 钢绳胶带输送机动力制动自动控制试验研究[J]. 河北煤炭建筑工程学院学报, 1997(1): 44-50.
YIN H, LI R Y. The experimental research of GJDK-1 power broke controlling system [J]. Journal of Hebei Mining and Civil Engineering Institute, 1997(1): 44-50.
- [6] 苏孝敏. 采用 PLC 双控制同步顶升引水渡槽施工技术研究[J]. 水力发电, 2017, 43(9): 58-61.
SU X M. Study of aqueduct construction with PLC double-control synchronous jacking technology [J]. Water Power, 2017, 43(9): 58-61.
- [7] 徐宏,郭敏. 既有简支梁桥整体同步顶升施工技术[J]. 世界桥梁, 2016, 44(2): 82-86.
XU H, GUO M. Construction techniques of global synchronized jacking for existing simply-supported beam bridge [J]. World Bridges, 2016, 44(2): 82-86.
- [8] 魏列江,顾青青,辛钰林,等. 顶模体系中多缸同步顶升液压控制系统设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 65-69.
WEI L J, GU Q Q, XIN Y L, et al. Design on hydraulic

- control system for multi-cylinder synchronous lifting of jack-up formwork system[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(11): 65-69.
- [9] 程伊彪, 陈勇. 连续梁悬臂牛腿病害无损主动加固技术[J]. *世界桥梁*, 2019, 47(3): 81-85.
CHENG Y B, CHEN Y. Nondestructive and active strengthening techniques to treat cantilever brackets damage in continuous beams[J]. *World Bridges*, 2019, 47(3): 81-85.
- [10] 于慧楠. 整体同步顶升梁板更换桥梁支座的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
YU H N. Application research on replacing bridge seat by rising whole girder board synchronously[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [11] 李方韬. 城市桥梁顶升改造设计与施工工艺[J]. *结构工程师*, 2016, 32(4): 176-182.
LI F T. Design and construction technology for lifting and reconstructing of urban bridges[J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(4): 176-182.
- [12] 陈梁, 朱利明, 蒋湘成. 斜交连续梁顶升过程仿真分析[J]. *中外公路*, 2016, 36(4): 161-166.
CHEN L, ZHU L M, JIANG X C. Simulation analysis of lifting process for skew continuous girders[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36(4): 161-166.
- [13] 孙明德, 班新林, 臧晓秋, 等. 铁路连续梁顶升法更换支座技术方案研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(8): 36-39.
SUN M D, BAN X L, ZANG X Q, et al. Research on technical scheme of railway continuous girder bearing replacement by jacking method[J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(8): 36-39.
- [14] 石华军. 城市高架桥梁体顶升及桥墩更换技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- SHI H J. Research on jacking-up technique and pier replacement of city viaduct[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [15] 牛建刚, 赵蒙蒙, 郝之鹏, 等. 同步顶升技术在连续箱梁桥支座更换中的应用[J]. *混凝土*, 2018(10): 140-142+147.
NIU J G, ZHAO M M, HAO Z P, et al. Application of synchronous jack-up technology in continuous box girder bridge bearing replacement[J]. *Concrete*, 2018(10): 140-142+147.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 桥梁顶升移位改造技术规范: GB/T 51256—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for bridge lifting, moving and reconstruction: GB/T 51256—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [17] 姚勇, 向沛昀, 李俊. 高速铁路混凝土简支箱梁桥地震偏移顶升与复位[J]. *世界桥梁*, 2023, 51(4): 107-113.
YAO Y, XIANG P Y, LI J. Jack-up and recentring of a simply-supported concrete girder high-speed railway bridge after earthquakes[J]. *World Bridges*, 2023, 51(4): 107-113.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

(责任编辑 周雪梅)