

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202204272024101967

文章编号:1674-599X(2024)05-0022-07

引用格式:宋旺,杨美良,刘佳豪.多跨刚构-连续组合桥合龙方案及顶推性能分析[J].交通科学与工程,2024,40(5):22-28.

Citation: SONG Wang, YANG Meiliang, LIU Jiahao. Closing scheme and pushing performance analysis of multi-span rigid structure-continuous composite bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5):22-28.

多跨刚构-连续组合桥合龙方案及顶推性能分析

宋旺,杨美良,刘佳豪

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:多跨刚构-连续组合桥的合龙和顶推方案决定了桥梁结构的内力和线形。为选择董家潭湘江特大桥(70+5×120+70)m的最佳合龙顶推方案,采用有限元软件建立不施加顶推力时4种不同合龙方案的有限元模型,通过对比分析成桥后主梁的位移和应力,初选2种较优合龙方案;在此基础上分析顶推方案并得到3种顶推工况,以消除墩顶水平位移为原则分别确定各工况下的顶推力,对施加顶推力的3种工况进行力学分析,选出最佳合龙顶推方案;最后,针对最佳合龙顶推方案进行顶推局部建模分析。研究结果表明:由边跨向中跨依次对称合龙,在中跨合龙前施加1 900 kN顶推力为该桥最佳合龙顶推方案,该方案的顶推局部应力和变形均满足要求。

关键词:刚构-连续组合桥;有限元;合龙方案;顶推力

中图分类号:U24

文献标志码:A

Closing scheme and pushing performance analysis of multi-span rigid structure-continuous composite bridge

SONG Wang, YANG Meiliang, LIU Jiahao

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The closing and pushing scheme of multi-span rigid structure-continuous composite bridge determines the internal force and linear shape of the bridge. In order to choose the best closing and pushing scheme of Dongjiatan Xiangjiang River Bridge (70+5×120+70) m, finite element models were established with finite element software for four different closing schemes when no pushing force was applied. The displacement and stress of the main beam after bridge completion were analyzed by comparison, and two optimal closing schemes were selected. On this basis, three kinds of pushing conditions were obtained by pushing scheme analysis. Under the principle of eliminating the horizontal displacement of the pier top, the pushing force in each working condition was determined. The best closing and pushing scheme was selected by mechanical analysis of the three working conditions under which pushing force was applied. Finally, the local modeling analysis of pushing was carried out for the best closing and pushing scheme. Research results indicate that symmetrically closing the bridge from the side span to the middle span and applying a pushing force of 1 900 kN before the closure of the middle span is the best closing and pushing scheme for the bridge. The local stress of pushing and deformation of the scheme meet the requirements.

Key words: rigid structure-continuous composite bridge; finite element; closing scheme; pushing force

收稿日期:2022-04-27

基金项目:湖南省教育厅重点科学研究项目(21A0213)

通信作者:杨美良(1967—),女,教授,主要从事桥梁新结构、新技术方面的研究工作。E-mail:1065506644@qq.com

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

刚构-连续组合桥结合了连续刚构桥和连续梁桥的优点,在桥梁建设中被广泛采用。该类型桥常采用挂篮悬臂施工法施工,在不同的合龙顶推方案下桥梁的力学性能有所不同,合龙顶推方案的分析选择是该类桥的研究重点^[1-2]。赵阳等^[3]以长沙市湘府路湘江大桥为工程案例,对比分析了该桥在不同合龙方案下的主梁位移和应力,得出合龙方案主要影响主梁位移而对主梁应力影响较小的结论,并说明了合龙顺序在施工过程中不可轻易更改的重要性。徐鹏等^[4]分析了同步合龙对某三跨连续刚构桥线形及应力的影响,得出边跨和中跨同步合龙对高墩大跨连续刚构桥线形及应力影响较小的结论。高新文^[5]以南河特大桥为例,分析了该桥合龙顶推力对主梁预拱度和桥梁力学性能的影响,得出顶推对桥墩内力影响较大的结论。杜钊等^[6]对顶推力作用下连续刚构桥的局部箱梁进行了受力分析,针对该桥需采用较大顶推力(5 000 kN)的情况,提出了四点顶推比两点顶推更合理、更安全的结论。由此可见,选择合理的合龙顶推方案对于桥梁保持较优力学状态有较大的实用价值。

本文通过对董家潭湘江特大桥合龙顺序和顶推力的分析,提出了该七跨刚构-连续组合桥的最佳合龙顶推方案,为保证该桥的顺利合龙和施工安全提供理论基础。

1 工程概况

董家潭湘江特大桥为预应力砼变截面刚构-连续组合箱梁桥,分左、右两幅,长(70+5×120+70) m。

本文以桥的左幅为例进行讨论,桥跨布置见图1(图中8#~15#为桥墩编号)。主梁为单箱单室直腹板箱梁,0号块根部梁高7.30 m,跨中及边跨合龙段梁高3.00 m,顶板宽12.75 m,底板宽为6.50 m,箱梁顶板设有2%的横坡,箱梁底板高度按1.8次抛物线变化。箱梁设置纵、横、竖三向预应力体系,采用直径为15.2 mm的低松弛预应力筋。下部结构采用实体桥墩连接承台及桩基础,其中11#墩和12#墩为固结墩,其余墩通过支座与箱梁连接。

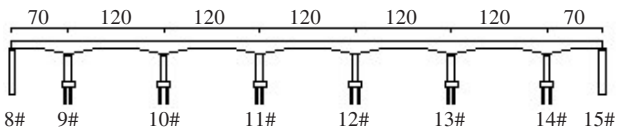


图1 桥跨布置图(单位:m)

Fig. 1 Bridge span layout (unit: m)

2 有限元模型及计算参数

董家潭湘江特大桥为七跨刚构-连续组合桥。本文采用Midas/Civil 2019软件建立有限元计算模型。将主梁划分成234个单元,将固结墩11#墩和12#墩共划分成60个单元。模拟了桥梁施工阶段的0号块施工段、13个挂篮悬臂施工段、2个边跨现浇段、2个边跨合龙段和5个中跨合龙段,成桥阶段的二期恒载、整体升降温、温度梯度、汽车荷载、支座沉降和10 a收缩徐变。其中,二期恒载包括桥面铺装层和护栏质量,桥梁设计合龙温度为20℃,整体升降温按±25℃考虑,温度梯度和汽车荷载按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)中的规定取值,支座沉降按1 cm考虑。其他参数见表1。

表1 有限元模型的计算参数

Table 1 The calculation parameters of the finite element model

主梁砼强度等级	桥墩砼强度等级	C55 砼弹性模量/(N·mm ⁻²)	C40 砼弹性模量/(N·mm ⁻²)	钢筋砼容重/(kN·m ⁻³)	砼泊松比	孔道偏差系数	孔道摩阻系数	松弛系数	锚具变形及回缩量/mm
C55	C40	35 500	32 500	26	0.2	0.001 5	0.25	0.3	6

3 不考虑顶推的合龙方案分析

3.1 合龙顺序分析

多跨刚构-连续组合梁桥的合龙方案会影响桥梁的变形和内力,也会影响工程的工期和成本,所以对于此类梁桥合适的合龙方案十分重要。常用

的合龙方案有:由桥梁一侧边跨依次向另一侧边跨合龙;由桥梁边跨对称向中跨合龙;由中跨对称向边跨合龙;全桥一次合龙等^[7]。

董家潭湘江特大桥为七跨刚构-连续组合桥,存在多种合龙方案,而不同合龙方案需施加的顶推力也不一样。根据现场实际情况及以往经验,本文提出了4种合龙方案(表2)。

表2 桥梁合龙方案

Table 2 Bridge closing scheme

方案	方案内容
1	边跨→次边跨→次中跨→中跨
2	次中跨→次边跨→边跨→中跨
3	边跨→中跨→次边跨→次中跨
4	中跨→边跨→次中跨→次边跨

上述4种方案的荷载相同,成桥边界条件也一样(表3),桩与承台、承台与墩均为刚性连接,11#、12#墩与主梁为弹性刚接。为统一变量,本文在不考虑顶推的情况下对不同合龙方案进行分析。

表3 成桥边界条件

Table 3 Bridge boundary conditions

位置	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
8#、9#、10#、13#、14#、15# 墩北侧	0	1	1	0	0	0
8#、9#、10#、13#、14#、15# 墩南侧	0	0	1	0	0	0
11#、12#桩底	1	1	1	1	1	1

注:表中DX、DY、DZ分别为X、Y、Z方向的平动自由度;RX、RY、RZ分别为X、Y、Z方向的转动自由度;“1”表示约束该方向的自由度;“0”表示不约束该方向的自由度。

3.2 不同合龙方案下主梁力学性能分析

成桥状态(二期恒载)下主梁上下缘应力分布如图2~3所示(由于结构对称,仅绘出全桥1/2长度的应力图,并规定拉应力为正,压应力为负)。

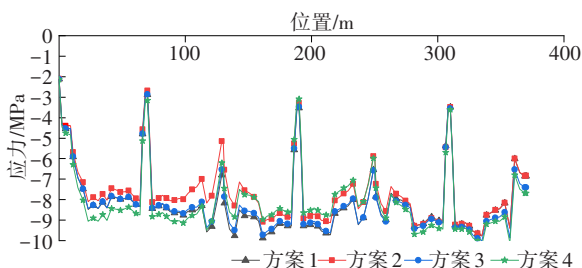


图2 各方案主梁上缘应力

Fig. 2 Upper edge stress of main girder for each scheme

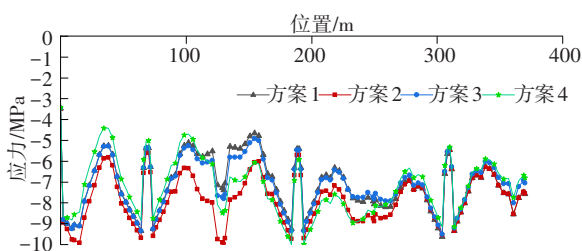


图3 各方案主梁下缘应力

Fig. 3 Lower edge stress of main girder for each scheme

由图2~3可知,对于上述4种方案,其上下缘应力的变化趋势基本一致,且数值相差不大;上下

缘应力较小值均出现在合龙段位置,应力较大值均出现在0号块根部位置。主梁在成桥状态(二期恒载)下,其上下缘均没有出现拉应力,全截面受压且压应力在合理范围之内。由此可见,不同合龙顺序对成桥应力的影响不大。

图4所示为成桥状态(二期恒载)下主梁的竖向累积位移(位移向上为正,向下为负)。

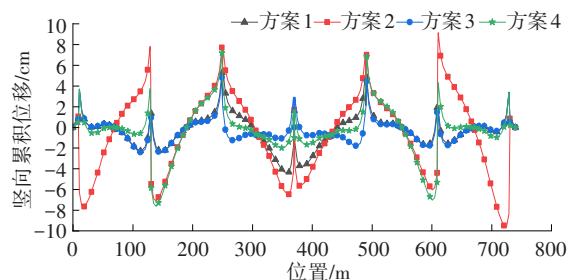


图4 各方案主梁竖向累积位移

Fig. 4 Vertical cumulative displacement of main girder for each scheme

由图4可知,这4种方案竖向累积位移变化趋势的差异比较明显,方案2和方案4竖向累积位移的变化幅度比方案1、方案3的大,方案2的竖向累积位移最大值(9.4 cm)出现在边跨,方案4的竖向累积位移最大值(7.3 cm)出现在次边跨。方案1基本不存在竖向累积位移的突变,方案2、方案3、方案4的则存在突变。由此可见,不同合龙顺序对成桥后主梁的竖向累积位移影响较大。

综上所述,在不考虑顶推时,4种方案应力差异不大,其竖向累积位移从大到小的排序为:方案2、方案4、方案1、方案3。所以在不考虑顶推时,初步选择方案1和方案3为较优方案。

4 考虑顶推的合龙方案分析

合龙顺序、合龙温差、混凝土收缩徐变等都会导致桥墩偏位^[3]。为了平衡这些因素引起的偏位,本文在中跨合龙前施加顶推力来优化桥墩位移。前文在分析合龙方案对主梁位移、应力的影响时,没有考虑顶推作用,但由于主梁截面是变截面,顶推会使主梁产生竖向偏位,因此需进行顶推后的主梁位移、应力分析。刚构-连续梁桥中的连续墩由于带有支座,在合龙温差和收缩徐变影响下的变形较小,所以本文主要分析顶推对固结墩的影响。

为了得到顶推力,需要分别分析合龙顺序、合龙温差、混凝土收缩徐变致使桥墩产生的位移。在

温度较低的晚间进行该桥的合龙施工,并通过人为控制使实际合龙温度接近设计合龙温度,所以本文未考虑合龙温差对桥墩偏位的影响。由混凝土收缩徐变引起的桥墩位移按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)中的收缩徐变模型计算(考虑10 a收缩徐变),并选择较优合龙方案1和方案3进行分析。

4.1 两种方案顶推工况分析

由于合龙顺序不同,方案1有两种顶推工况(工况1、工况2),方案3有一种顶推工况(工况3),见表4及图5。图5中圆圈内的数字代表合龙顺序,箭头代表顶推方向, F 为顶推力。

表4 桥梁合龙方案

Table 4 Bridge closing scheme

顶推工况	具体内容
1	边跨合龙→次边跨合龙→次中跨合龙→中跨顶推→中跨合龙
2	边跨合龙→次边跨合龙→中跨顶推→次中跨合龙→中跨合龙
3	边跨合龙→中跨顶推→中跨合龙→次边跨合龙→次中跨合龙

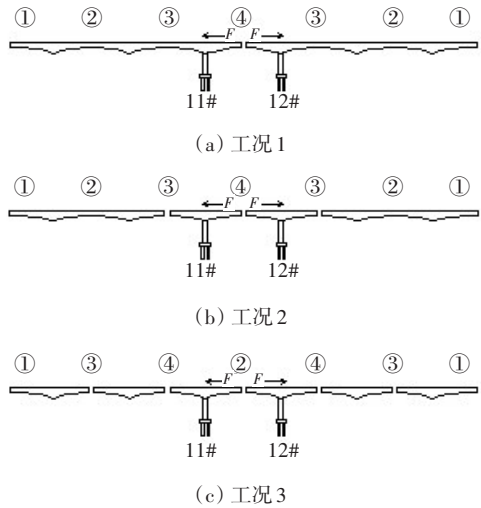


图5 顶推时的全桥状态

Fig. 5 State of full bridge during pushing

4.2 顶推力的分析计算

由图5可知,工况1的顶推力作用于超静定结构上,工况2和工况3的顶推力作用于单独“T”构上,工况1由桥墩变形和支座摩阻力共同提供抵抗力,工况2、工况3由桥墩变形提供抵抗力。由于结构复杂,难以将梁桥简化成杆系结构进行理论计算^[8],故本文通过Midas/Civil 2019有限元模型分别施加0(不顶推)、100、250、500、800、1 200、1 500、

1 800、2 200 kN的顶推力,试算工况1、工况2、工况3在10 a收缩徐变后的墩顶水平位移。由于桥梁对称,本文只绘制了11#墩墩顶水平位移与顶推力的关系曲线,如图6所示(位移向右为正,向左为负)。

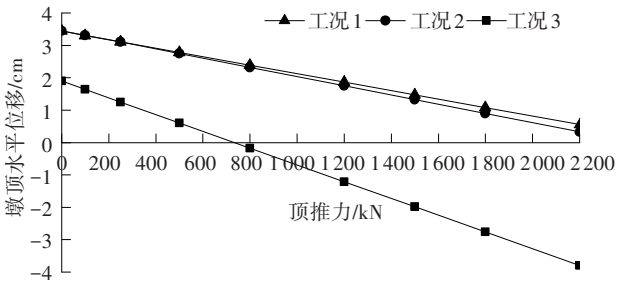


图6 11#墩墩顶水平位移与顶推力的关系

Fig. 6 Relationship between horizontal displacement of pier top and pushing force for the pier 11#

由图6可知,在这3种工况下顶推力与墩顶水平位移成线性关系。由工况1和工况2可知,在考虑10 a收缩徐变时,在相同的合龙顺序下不同顶推工况对墩顶水平位移的影响不大,说明考虑10 a收缩徐变时,单独顶推“T”构和顶推超静定结构产生的墩顶水平位移差异不大。当顶推力为0 kN(不顶推)时,工况3的墩顶水平位移为1.936 cm,工况1、工况2的墩顶水平位移为3.496 cm,说明不同合龙顺序对墩顶水平位移的影响较大。

本文以消除刚构墩墩顶水平位移为原则来计算所需的顶推力大小。理论上需要消除墩顶全部水平位移,但在实际工程中为了防止顶推力过大对成桥阶段的墩顶产生过大的反向位移,故根据工程经验取不顶推情况下墩顶水平位移的70%~75%作为顶推位移值^[9]。根据图6通过分析计算,可对工况1、工况2施加1 900 kN的顶推力,对工况3施加670 kN的顶推力,此时工况1墩顶的水平位移为0.947 cm,工况2墩顶的水平位移为0.887 cm,工况3墩顶的水平位移为0.493 cm,都满足消除水平位移70%~75%的要求。

4.3 施加顶推力的桥梁力学分析

在上述3种工况下,分别施加顶推力后得到的主梁(1/2跨)应力如图7~8所示(拉应力为正,压应力为负)。

由图7~8可知,不同工况下,主梁上下缘应力变化趋势基本一致,应力数值有差异的梁段主要为次中跨,差异在1.5 MPa以内;施加顶推力的主梁全截面受压,最大上缘压应力为9.6 MPa,最大下缘压应力为10.2 MPa。工况1和工况2的合龙顶推顺序

不一样,工况3的合龙顶推顺序和顶推力与工况1、工况2的都不一样,但应力的计算结果相近,说明不同合龙顶推顺序和顶推力对主梁应力的影响不大。

在上述3种工况下,施加顶推力的主梁竖向累积位移如图9所示(位移向上为正,向下为负)。

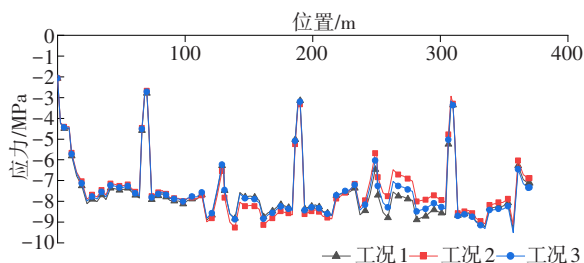


图7 各工况下主梁上缘应力

Fig. 7 Upper edge stress of main girder under each working condition

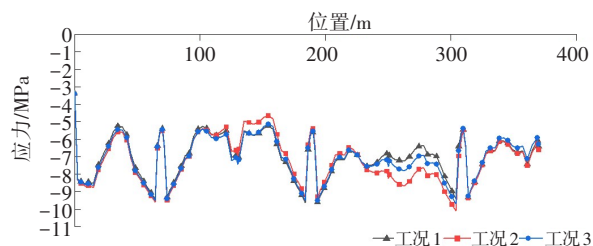


图8 各工况下主梁下缘应力

Fig. 8 Lower edge stress of main girder under each working condition

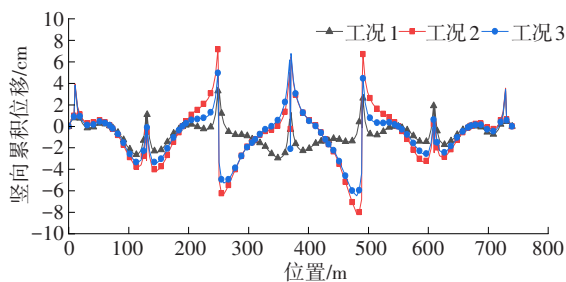


图9 各工况下主梁竖向累积位移

Fig. 9 Vertical cumulative displacement of main girder under each working condition

由图9可知,在这3种工况下竖向累积位移的差异主要发生在次中跨和中跨;工况1和工况2图形的变化趋势相差较大,说明单独顶推“T”构比顶推超静定结构对主梁竖向累积位移的影响大,这是因为单独顶推“T”构后中跨往上翘、次中跨往下沉引起的变形较大。工况2和工况3的竖向累积位移存在突变,工况2的竖向累积位移最大值为8.1 cm,

工况3的竖向累积位移最大值为6.4 cm;工况1的竖向累积位移无突变,其最大值为4.2 cm。由此可见,不同合龙顶推顺序和顶推力对主梁竖向累积位移的影响较大。

在上述3种工况下,桥墩弯矩的计算结果见表5(弯矩向左为正,向右为负)。

表5 考虑10 a收缩徐变的刚构墩弯矩

Table 5 Bending moment of rigid frame piers considering 10-year shrinkage and creep

工况	顶推力/kN	11#墩弯矩/(kN·m)		12#墩弯矩/(kN·m)	
		墩顶	墩底	墩顶	墩底
1	0(不顶推)	-10 858	33 682	12 323	-32 760
	1 900	-1 236	8 790	2 659	-6 827
2	0(不顶推)	-10 858	33 682	12 323	-32 760
	1 900	-20 323	14 950	24 664	-12 955
3	0(不顶推)	-11 359	20 552	13 699	-20 118
	670	-14 527	6 396	16 868	-5 126

由表5可知,在工况1中顶推力作用于超静定结构上,施加顶推力后墩顶和墩底弯矩相对于不顶推时都得到了改善;工况2、工况3的顶推力作用于“T”构上,单独顶推“T”构时墩顶弯矩较不顶推时有所增大,但墩底弯矩有所减小。工况1在顶推后墩顶和墩底弯矩都较小,整体弯矩情况比工况2和工况3的好。总的来说,这3种工况对于改善墩底弯矩都有利。

综上所述,工况1的力学性能比工况2、工况3的好,所以考虑顶推时,合龙方案1中的工况1为最优方案,该方案对应的顶推力为1 900 kN。

4.4 顶推位置分析

上述最优方案中的1 900 kN顶推力是作用在截面形心上的,因此需计算顶推截面的形心位置。由于箱形截面复杂且带有2%的横坡,为简化计算,不考虑横坡,按左右对称情形计算截面形心。以箱梁顶板为 x 轴、垂直于顶板的对称轴为 y 轴建立坐标系,如图10所示。由于截面对称,所以形心位于对称轴上,形心点的 x 坐标为0,只需计算其 y 轴坐标。利用材料力学^[10]面积矩和形心的关系计算形心点的 y 轴坐标为:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = -109 \text{ cm} \quad (1)$$

式中: A_i 为微面积; y_i 为微面积形心到 x 轴的距离。

所以该箱形截面形心点A的坐标为(0,-109)。在实际施工时,无法在截面形心处施加顶推力,通常采用两点顶推的方法将顶推力施加在腹板上,且为了防止顶推处出现混凝土局部应力集中的现象,采用预埋钢垫板来分散顶推力。根据箱梁实际尺寸,选择预埋钢垫板的尺寸为40.0 cm×40.0 cm×2.5 cm,钢垫板中心点位于腹板中心且与形心点A等高。钢垫板(顶推)位置如图10所示。

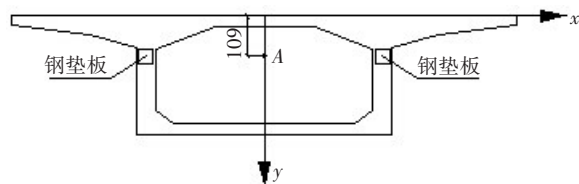


图10 截面形心及顶推位置图(单位:cm)

Fig. 10 Sectional centroid and pushing position diagram
(unit: cm)

4.5 局部顶推结果分析

采用MIDAS FEA NX有限元软件建立顶推位置局部有限元模型,选取与合龙段相邻的3个梁段共12 m长的箱梁进行分析^[6]。根据钢垫板与混凝土箱梁实际尺寸建立实体模型并划分网格,钢垫板和混凝土接触面节点耦合,不产生相对变形。因仅考虑箱梁局部受力与变形,远离合龙段的箱梁端节点全部固结,故将1 900 kN的顶推力换算成0.597 kN/cm²的均布荷载作用于钢垫板上。C55砼弹性模量为 3.55×10^4 MPa,泊松比为0.2;钢垫板弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为0.3,有限元模型未考虑普通钢筋和预应力筋的影响。

根据有限元模型分析计算可知,在顶推力作用下箱梁主拉应力主要分布在钢垫板周围,且最大主拉应力出现在钢垫板上缘的右腹板倒角处,大小为1.698 MPa。该拉应力值小于C55砼的容许拉应力值1.96 MPa,满足砼抗裂要求。为防止顶推作用导致箱梁局部变形过大,影响后续合龙,需分析箱梁的局部横向位移和纵向位移。根据有限元模型分析计算可知,在顶推力作用下箱梁发生向外侧的变形,最大横向位移0.018 mm出现在右腹板靠近下部的倒角处;纵向变形主要发生在顶推位置周围,且最大纵向位移发生在顶推位置中心处,数值为0.181 mm。由此可知,箱梁局部横向和纵向变形都很小,未超过规范容许值,不会影响后续合龙,符合要求。

5 讨论

董家潭湘江特大桥最佳合龙方案是通过有限元软件计算分析得到的,可能与实际施工存在差异,因此以下几点需要注意^[11-14]:

1) 对该桥连续梁段采用悬臂浇筑法施工时,桥墩和主梁连接处需要采用临时固结措施,在进行有限元模拟时,在每跨合龙后需随即拆除该跨的临时固结,在实际施工时临时固结的拆除顺序要与有限元计算模型所模拟的相对应。

2) 在分析过程中未考虑合龙温差的影响,所以在实际合龙时需要科学选择合龙温度,如果实际合龙温度与设计合龙温度有差异,需要考虑合龙温差的影响。

3) 实际施工情况的差异以及支座摩阻力的影响,使得顶推力与顶推位移不能一一对应。在实际施工过程中,应采用墩顶偏移控制为主、顶推力控制为辅的双重控制原则。顶推时需同步缓慢逐级加载,并需监测顶推力的增长速率和墩顶的偏位,当出现问题时应停止顶推,并及时研究处理措施。

4) 该类型桥在施工时,需有合理科学的施工监控,主要对主梁轴线、主梁标高、桥墩偏移量、合龙段长度变化、关键断面应力及温度进行监测,及时掌握线形、内力情况以便调整,保证桥梁施工过程中的安全和成桥线形的平顺。

6 结论

1) 合龙顺序、顶推力、顶推方案会对主梁竖向累积位移产生一定影响,但对主梁上下缘应力影响很小,无需将应力作为选择合龙方案时考虑的主要因素。

2) 通过计算得出了董家潭湘江特大桥需施加的顶推力大小和顶推的具体位置,计算结果可为具体施工提供参考。

3) 仅考虑合龙顺序时,合龙方案3为最优选择;当考虑顶推时,合龙方案1中的工况1为最优选择,即由边跨向中跨依次对称合龙,在中跨合龙前施加1 900 kN的顶推力,此时桥梁整体和局部应力、变形都能满足要求。

参考文献(References):

- [1] 刘小燕, 邹爱平, 朱杰, 等. 大跨度桥梁挂篮施工风险评估[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.003. LIU Xiaoyan, ZOU Aiping, ZHU Jie, et al. Risk assessment of hanging basket construction of long-span bridge[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.04.003.
- [2] 付春雨, 沈卢明, 严鹏. 温度对大跨度斜拉桥主梁合龙口长度的作用机理分析[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 177-181. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.028. FU Chunyu, SHEN Luming, YAN Peng. Mechanism analysis of temperature effects on closure length of main girder of long-span cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 177-181. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.028.
- [3] 赵阳, 安亚平. 刚构-连续组合体系桥梁合龙方案分析[J]. 公路与汽运, 2014(2): 177-181. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2014.02.048. ZHAO Yang, AN Yaping. Analysis of closure scheme of rigid frame-continuous composite system bridge beam[J]. Highways & Automotive Applications, 2014(2): 177-181. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2014.02.048.
- [4] 徐鹏, 王达, 程东亚. 同步合龙方案下刚构桥线形及应力的影响[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 69-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.02.013. XU Peng, WANG Da, CHENG Dongya. Influence of synchronous closure scheme on the alignment and stress of the rigid frame bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 69-74. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2019.02.013.
- [5] 高新文. 大跨度连续刚构桥合龙顶推效应分析及方案研究[J]. 公路与汽运, 2009(4): 189-191. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2009.04.062. GAO Xinwen. Analysis and scheme study on the pushing effect of closure of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Highways & Automotive Applications, 2009(4): 189-191. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2009.04.062.
- [6] 杜钊, 赵伟, 陈家龙, 等. 连续刚构桥四点合龙顶推下箱梁局部受力分析[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 30-35. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.04.005. DU Zhao, ZHAO Wei, CHEN Jialong, et al. Local force analysis of box girder of continuous rigid frame bridge considering closure four-point thrust[J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 30-35. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.04.005.
- [7] 张凯丽. 某预应力混凝土刚构-连续梁组合桥合龙关键技术研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020. ZHANG Kaili. Research on key technology of closure of a prestressed concrete rigid frame-continuous beam composite bridge [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [8] 梁乾敏, 邬晓光, 邓淇元. 多跨连续刚构桥合龙顶推力的优化[J]. 铁道建筑, 2020, 60(11): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.11.09. LIANG Qianmin, WU Xiaoguang, DENG Qiyuan. Optimization of closure jacking force of multi-span continuous rigid frame bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(11): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.11.09.
- [9] 梁勇旗. 高墩多跨连续刚构桥合龙方案及合龙顶推力计算研究[J]. 公路, 2016, 61(8): 116-119. LIANG Yongqi. Study on closure plan and closure top thrust calculation of multi-span continuous rigid frame bridge with high pier[J]. Highway, 2016, 61(8): 116-119.
- [10] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2009. SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. Mechanics of materials [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [11] 赵曰琦, 杨子江, 刘世忠. 州河特大桥合龙方案改变可行性分析研究[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(1): 23-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2012.01.006. ZHAO Yueqi, YANG Zijiang, LIU Shizhong. Analysis of closure scheme change for Zhou River Bridge [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(1): 23-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2012.01.006.
- [12] 许明雷, 罗力军. 排调河一号特大桥中跨合龙顶推控制[J]. 桥梁建设, 2011, 41(4): 79-82. XU Minglei, LUO Lijun. Control of pushing for closure of central span of Paidiao River Bridge No. 1 [J]. Bridge Construction, 2011, 41(4): 79-82.
- [13] 赵天元. 沉湖汉江特大桥主桥连续刚构施工技术[J]. 桥梁建设, 2012, 42(1): 108-112. ZHAO Tianyuan. Construction techniques for continuous rigid frame of main bridge of Chenhu Hanjiang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2012, 42(1): 108-112.
- [14] 户东阳, 刘鹏, 熊亮, 等. 基于拟静力位移的桥梁损伤定位研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 24-32. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023100823121985. HU Dongyang, LIU Peng, XIONG Liang, et al. Research on bridge damage localization based on pseudo-static displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(6): 24-32. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023100823121985.

(责任编辑:石月珍)