

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.02.033

大跨度节段预制悬臂拼装桥施工过程受力研究

李晓兵, 尚鹏军

(中铁电气化局集团铁路工程公司, 北京市 100036)

摘 要: 以郑州西四环主线桥为工程背景, 结合国内外研究成果, 针对节段拼装桥梁的力学性能进行研究分析, 利用有限元软件 Midas Civil 建立大跨度节段预制悬臂拼装梁桥全桥有限元模型, 计算分析桥梁静力学性能, 通过对节段拼装梁桥进行受力分析, 得出背景工程桥梁在不同荷载组合工况作用下受力合理, 满足规范要求, 研究结论可为同类桥梁结构计算提供参考。

关键词: 节段预制; 悬臂拼装; 施工过程; Midas civil; 受力分析

中图分类号: U445 文献标志码: B 文章编号: 1009-7716(2021)02-0118-05

0 引 言

基于城镇化建设量大、城市交通压力大、节能环保要求高、人力成本上升快等社会背景, 城市桥梁绿色建造技术(预制装配式桥梁)越来越为地方政府所重视, 得到大力推广和发展^[1]。本文以郑州四环线工程中西四环 K78+362~K79+748 段郑上路立交主线桥第 6 联节段预制拼装连续梁桥为工程背景, 对该类桥梁的力学性能进行研究分析。

1 工程概况

郑州市四环线及大河路快速化工程建设位于郑州市主城区区域与外围区域交界处, 由大河路、东四环、南四环及西四环组成闭合环线, 路线总长度约为 93 km。该项目是郑州市快速路系统的重要组成部分, 也是国家建设中心城市加快推进的交通基础设施重大项目之一。

郑州西四环主线桥桥面宽 16.5 m, 设置 2% 单向横坡, 其跨径布置为 40 m+66 m+40 m, 联长 146 m。单个箱梁宽度为 16.5 m, 底板宽 2.8 m, 悬臂长度为 4.0 m, 箱梁梁高为 2.2~3.6 m。构造布置如图 1 所示。箱梁纵向预应力为全体内预应力体系, 体内预应力钢绞线采用 15 ϕ 15.2、17 ϕ 15.2、19 ϕ 15.2、21 ϕ 15.2 四种规格, 锚下张拉控制为 1 395 MPa, 主要在箱梁顶板、底板和腹板处^[2]。

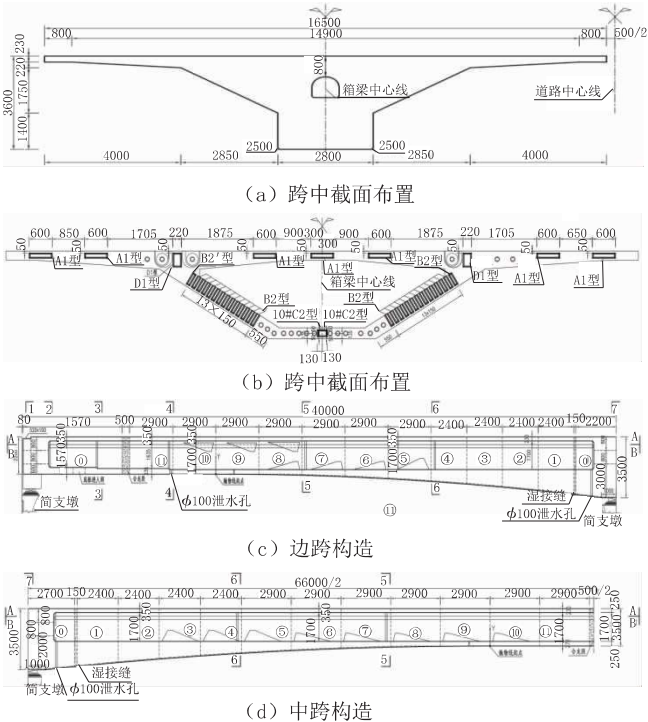


图 1 (40+66+40)m 连续梁构造布置示意图(单位: cm)

2 空间有限元模型的建立

利用有限元软件 Midas Civil2015 建立上部结构空间有限元模型, 如图 2 所示。采用梁单元并按照箱梁截面变化情况进行模拟, 全桥一共划分位 212 个节点, 214 个单元。节段预制箱梁及湿接缝材料均设置为 C60 混凝土, 预应力钢束采用公称直径 15.2 mm、抗拉强度标准值、弹性模量的高强度低松弛(Ⅱ级松弛)钢绞线。汽车荷载为城市-A 级, 车道荷载布置为 4 车道, 考虑基础变位, 边墩工后沉降差采用 10 mm, 中墩工后沉降差采用 15 mm。胶接缝位置的环氧树脂

收稿日期: 2020-11-13
作者简介: 李晓兵(1975—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事桥梁施工技术管理。

胶通过建立微小长度单元并赋予胶体材料特性进行模拟^[3-5],胶体材料特性见表 1。

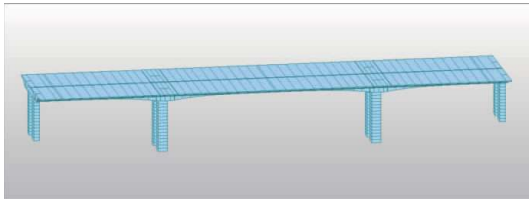


图 2 全桥有限元模型

表 1 CBMR-A/B 桥梁节段拼接环氧树脂胶性能指标

胶体性能		粘接能力	
抗拉强度 /MPa	40	钢 - 钢 T 冲击剥离能力 /mm	20
抗拉弹性模量 /MPa	3 200	钢 - 钢拉伸抗剪强度标准值 /MPa	15
抗弯强度 /MPa	50	以钢为基材正拉粘接强度 /MPa	15
抗压强度 /MPa	80	与混凝土的正拉粘接强度 /MPa	2.5
伸长率 /%	1.5		

本文模型是按照施工过程进行模拟计算,在悬臂施工过程中桥梁结构体系存在体系转换,即在施工过程中结构的边界条件会产生变化。边跨合龙前,中墩悬臂拼装段为静定 T 构;中跨合龙后,整个结构变成连续梁结构。模拟计算时,在边跨合龙前,中墩临时固结。在中跨合龙后,中墩解除临时固结,进行体系转换。中跨合龙后,边墩为活动支座,中墩转为永久固定支座。全桥总共定义 31 个施工阶段(见表 2),先边跨合龙再中跨合龙,最后施加移动荷载工况。计算中模拟了预应力的张拉及其损失,混凝土的收缩徐变,以及合龙后预应力产生的二次力,收缩徐变产生的超静定二次力。

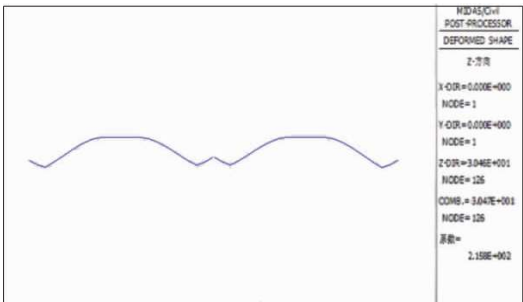
3 节段预制悬臂拼装梁桥施工阶段受力分析

3.1 T 构状态下最大悬臂阶段

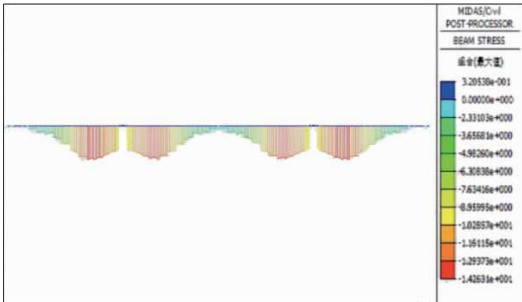
郑州西四环主线桥最大悬臂阶段施工主要分为 11# 节段拼装和预应力张拉两个过程。拼装阶段在模型中激活 11# 块所有单元并给予自重荷载来进行模拟,拼装后悬臂出现下挠的趋势,11# 块端点处挠度为 -28.50 mm,此时悬臂根部顶板压应力为 7.36 MPa;张拉阶段是在模型中 11# 块的预应力筋用等效荷载的方式施加在所有单元上,在张拉过程中 11# 块端点呈现上挠的趋势,张拉后端点的挠度为 -23.29 mm,此时悬臂根部顶板压应力为 9.52 MPa。此处仅给出 T 构最大悬臂阶段张拉预应力后梁单元模型的变形及应力分布图,如图 3 所示。

表 2 施工阶段表

施工阶段	持续时间	阶段描述
1	1	激活 0# 块梁段;施加(激活)自重荷载;激活临时支座和临时支架
2	1	吊装第一节段
3	3	现浇 15 cm 湿接缝
4	1	张拉第一节段预应力
5~24	1	分别对称拼装第一节段到第十一节段,每安装一个节段,并张拉对应的顶底板预应力
25	3	现浇 50 cm 边跨合拢
26	1	预应力束张拉
27	3	现浇 50 cm 中跨合拢
28	1	预应力束张拉
29	1	拆除临时支架;钝化临时支座;激活永久支座
30	10	二期恒载



(a) 最大悬臂阶段主梁位移(单位: mm)

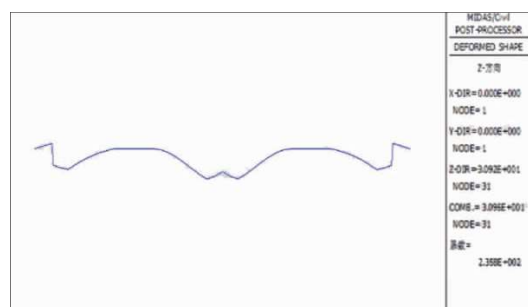


(b) 最大悬臂阶段主梁应力(单位: MPa)

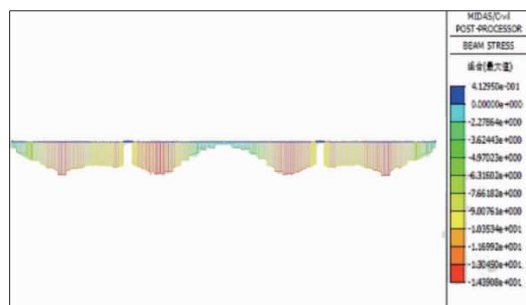
图 3 最大悬臂阶段张拉后梁体变形及应力图

3.2 边跨合拢阶段

郑州西四环主线桥边跨合拢主要分为支架搭设、边跨现浇段施工、合拢段浇筑、释放边墩支座纵向约束和合拢段预应力钢束张拉 5 个步骤,此处仅给出钢束张拉后的变形图和应力图。合拢后边跨挠度上升,最大挠度发生在 7 号节点,最大值为 -19.17 mm,中跨部分引起向下的挠度,最大挠度发生在 31 号节点,最大值为 -30.92 mm。截面最大压应力发生在边跨跨中附近,最大值为 14.39 MPa。边跨合拢阶段张拉后梁单元模型变形及应力分布如图 4 所示。



(a) 边跨合拢阶段主梁变形 (单位: mm)

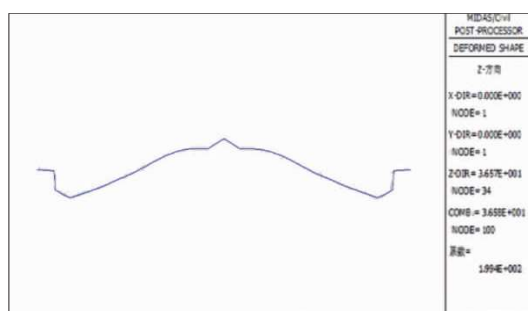


(b) 边跨合拢阶段主梁应力 (单位: MPa)

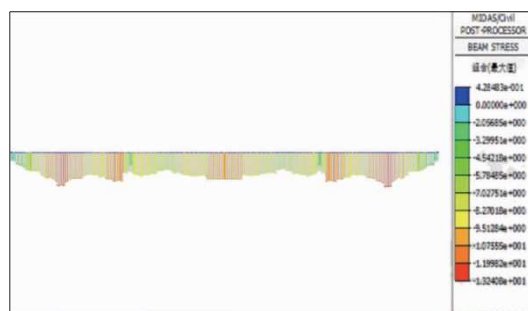
图4 边跨合拢阶段张拉后梁体变形及应力图

3.3 中跨合拢阶段

郑州西四环主线桥中跨合拢主要分为支架搭设、合拢段浇筑、释放中墩支座纵向约束、合拢段预应力钢束张拉和拆除临时支架转换永久支座5个步骤,此处仅给出拆除临时支架转换永久支座后的变形图和应力图。合拢后边跨挠度下沉,最大挠度值为 -25.66 mm ,中跨部分挠度上升,最大挠度值为 36.57 mm 。截面最大压应力为 13.25 MPa 。中跨合拢阶段完成后的梁单元模型变形及应力分布如图5所示。



(a) 中跨合拢阶段主梁变形 (单位: mm)

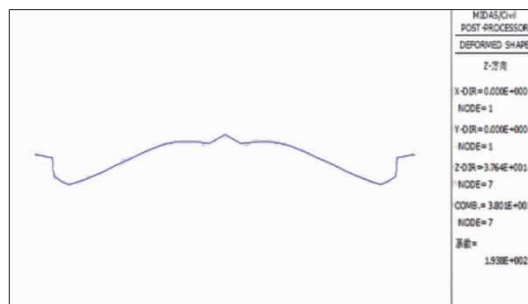


(b) 中跨合拢阶段主梁应力 (单位: MPa)

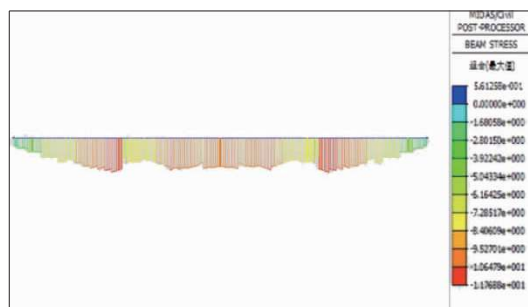
图5 中跨合拢完成后梁体变形及应力图

3.4 二期铺装阶段

二期恒载铺装阶段即桥面铺装及其附属设施的施工,在模型模拟中对桥面铺装荷载和附属设施荷载进行等效荷载转换作用在结构上,使得结构整体挠度下沉,边跨最大挠度值为 -37.63 mm ,中跨最大挠度值为 24.38 mm 。截面最大压应力为 11.76 MPa 。二期铺装阶段三维空间梁单元模型的应力分布如图6所示。



(a) 二期铺装阶段主梁变形 (单位: mm)



(b) 二期铺装阶段主梁应力 (单位: MPa)

图6 二期铺装阶段梁体变形及应力图

由图3~图6可知,在关键施工阶段的截面理论应力均为压应力,理论最大压应力为 14.39 MPa ,截面未出现拉应力,满足设计要求。

4 节段预制拼装梁桥整体受力分析

4.1 计算荷载

分析模型中计算荷载主要包括恒载(一期和二期)和预应力荷载以及桥面施工荷载(包括机械及模板重量)等,梁体温度设置为体系升温 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$,体系降温 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$,并考虑升温梯度 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温梯度 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中预应力是对节段拼装梁梁段变形影响最大的荷载之一,在分析计算过程中,根据各预应力钢绞线的几何形状以及空间位置坐标,在有限元软件中设置预应力钢绞线的布设形状以及作用单元号,整座桥梁共计布设248束预应力钢绞线。根据设计图纸,孔道摩阻系数及孔道偏差系数初值分别设置为0.17和0.0015,采用两端张拉的方式施加预应力,张拉控制应力为 1395 MPa 。荷载工况及工况组合见表3和表4。

表 3 荷载工况列表

编号	项目	编号	项目
①	自重(一恒+二恒)	⑥	城市-A级荷载
②	预应力(钢束一次)	⑦	整体升温
③	次内力(钢束二次)	⑧	整体降温
④	收缩徐变	⑨	梯度升温

4.2 整体受力分析

4.2.1 成桥阶段内力

全桥结构施工阶段完成以后,桥梁即达到成桥状态,成桥后的全桥内力状态如图 7~图 9 所示。

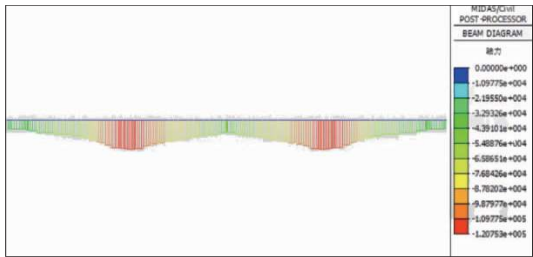


图 7 成桥阶段全桥轴力图(单位:kN)

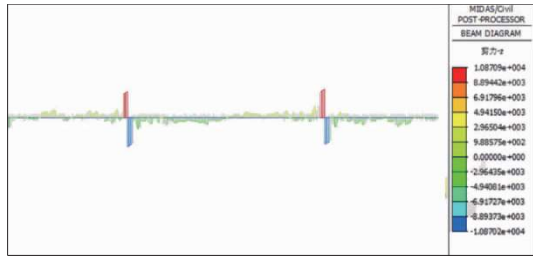


图 8 成桥阶段全桥剪力图(单位:kN)

对承载力极限状态基本组合进行分析,上部桥梁结构在荷载组合工况下的弯矩包络图如图 10 所示。

在不同荷载组合工况中,中跨跨中截面处最大

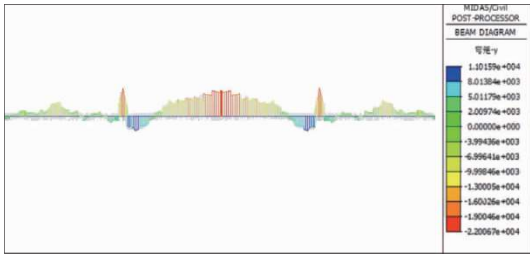
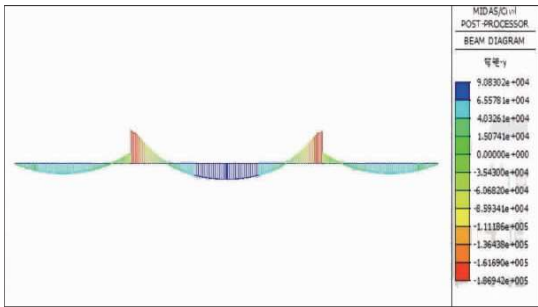
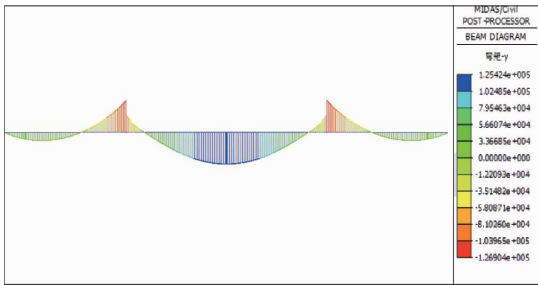


图 9 成桥阶段全桥弯矩图(单位:kN·m)



(a) 针对跨中弯矩包络图



(b) 针对墩顶弯矩包络图

图 10 承载力极限状态弯矩包络图(单位:kN·m)

正弯矩为 125 424 kN·m,中墩墩顶截面处最大负弯矩为 186 942 kN·m。均满足截面极限承载力要求。

4.2.2 截面抗裂计算

(1)正截面抗裂验算

表 4 荷载工况组合列表

工况	组合	内容	备注
1	承载力极限状态基本组合 1	$1.1 \times (1.2 \times \textcircled{1} + 1.2 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 0.5 \times \textcircled{5} + 1.4 \times \textcircled{6} + 0.75 \times (1.4 \times \textcircled{7} + 1.4 \times \textcircled{9}))$	整体升温+梯度升温,次内力不利
2	承载力极限状态基本组合 2	$1.1 \times (1.2 \times \textcircled{1} + 1.2 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 0.5 \times \textcircled{5} + 1.4 \times \textcircled{6} + 0.75 \times (1.4 \times \textcircled{8} + 1.4 \times \textcircled{10}))$	整体降温+梯度降温,次内力不利
3	承载力极限状态基本组合 3	$1.1 \times (1.2 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 0.5 \times \textcircled{5} + 1.4 \times \textcircled{6} + 0.75 \times (1.4 \times \textcircled{7} + 1.4 \times \textcircled{9}))$	整体升温+梯度升温,次内力有利
4	承载力极限状态基本组合 4	$1.1 \times (1.2 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 0.5 \times \textcircled{5} + 1.4 \times \textcircled{6} + 0.75 \times (1.4 \times \textcircled{8} + 1.4 \times \textcircled{10}))$	整体降温+梯度降温,次内力有利
5	正常使用极限状态基本组合 1	$1.0 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{4} + 1.0 \times \textcircled{5} + 0.7 \times \textcircled{6} + 1.0 \times \textcircled{7} + 0.8 \times \textcircled{9}$	整体升温+梯度升温,短期组合
6	正常使用极限状态基本组合 2	$1.0 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{4} + 1.0 \times \textcircled{5} + 0.7 \times \textcircled{6} + 1.0 \times \textcircled{8} + 0.8 \times \textcircled{10}$	整体降温+梯度降温,短期组合
7	标准值组合 1	$1.0 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{2} + 1.0 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 1.0 \times \textcircled{5} + 1.0 \times \textcircled{6} + 1.0 \times \textcircled{7} + 1.0 \times \textcircled{9}$	整体升温+梯度升温,标准组合
8	标准值组合 2	$1.0 \times \textcircled{1} + 1.0 \times \textcircled{2} + 1.0 \times \textcircled{3} + 1.0 \times \textcircled{4} + 1.0 \times \textcircled{5} + 1.0 \times \textcircled{6} + 1.0 \times \textcircled{8} + 1.0 \times \textcircled{10}$	整体降温+梯度降温,标准组合

全预应力混凝土梁正截面抗裂验算需满足在 0.85 倍预应力效应的情况下,作用短期效应组合的截面应力均为压应力。验算组合如下所示:

a. 自重荷载(一期+二期)+0.85 预应力效应+0.7 汽车荷载+整体升温+0.8 梯度升温+收缩徐变+支座沉降。

b. 自重荷载(一期+二期)+0.85 预应力效应+0.7 汽车荷载+整体降温+0.8 梯度降温+收缩徐变+支座沉降。

组合作用下的结构应力如图 11 所示。

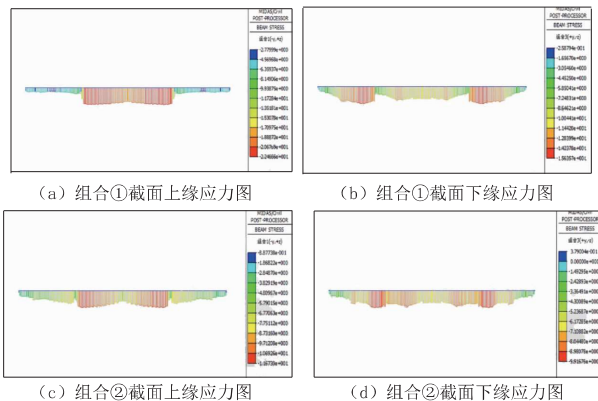


图 11 不同组合工况下结构应力图(单位:MPa)

由图 11 可以看出,在两种组合下的结构截面上、下缘应力均为压应力,没有出现拉应力的情况,满足规范正截面抗裂要求。

(2)斜截面抗裂验算

全预应力混凝土梁斜截面抗裂验算需对构件的斜截面混凝土主拉应力进行计算,在短期效应组合作用下需要满足 $\sigma_{tp} \leq 0.4 f_{tk} = 0.4 \times 2.85 = 1.14 \text{ MPa}$ 。验算组合如下所示:

a. 自重荷载(一期+二期)+预应力效应+0.7 汽车荷载+整体升温+0.8 梯度升温+收缩徐变+支座沉降。

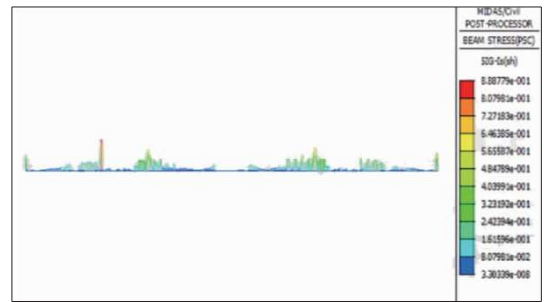
b. 自重荷载(一期+二期)+预应力效应+0.7 汽车荷载+整体降温+0.8 梯度降温+收缩徐变+支座沉降。

组合作用下的结构应力如图 12 所示。

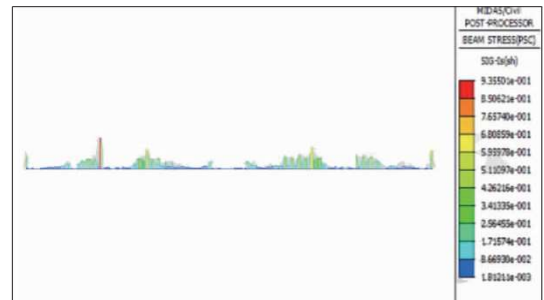
由图 12(a)可以得知组合①作用下的主拉应力为 0.89 MPa;由图 12(b)可知组合②作用下的主拉应力为 0.94 MPa。两种组合作用下的主拉应力最大值均小于规范要求值 1.14 MPa,满足规范斜截面抗裂要求。

(3)持久状态下构件应力验算

对主梁进行主压应力验算时,在标准组合作用下的主压应力最大值需要满足 $\sigma_{cp} \leq 0.6 f_{ck} = 0.6 \times$



(a) 组合①作用下主拉应力图



(b) 组合②作用下主拉应力图

图 12 不同组合工况下结构主拉应力图(单位:MPa)

38.5=23.1 MPa,由表 4 中工况 7 和工况 8 得应力如图 13 所示。

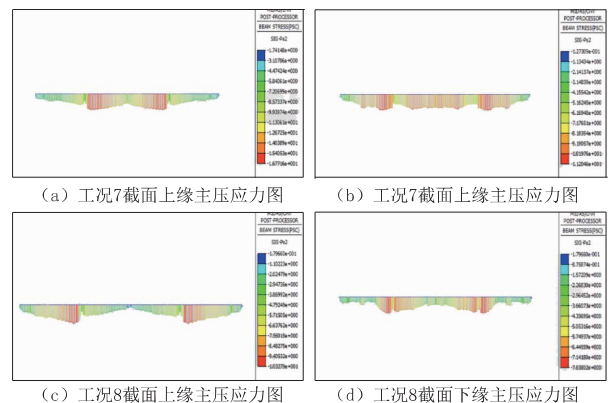


图 13 不同工况下结构主压应力图(单位:MPa)

图 13(a)主压应力最大值为 16.77 MPa;图 13(b)主压应力最大值为 11.20 MPa;图 13(c)主压应力最大值为 10.33 MPa;图 13(d)主压应力最大值为 7.84 MPa。可以看出,全桥截面没有出现拉应力,只存在压应力,不同工况作用下载面的最大主压应力均符合规范规定的要求。

5 结 论

随着我国桥梁技术的快速发展,节段预制拼装施工开始逐渐成为预应力混凝土桥梁的主要施工方法之一。文中结合郑州西四环节段预制胶接拼装连续梁桥项目通过有限元软件 MIDAS Civil 对节段拼装梁桥的力学性能进行了模拟分析,得出如下结论。

(1)节段预制拼装梁桥静力学分析中采用微小长度单元模拟胶体并忽略接缝处其他构造因素将其作

(下转第 125 页)

查,重点关注转铰结构。

4.3 主塔竖转施工

(1)逐级加载完成并检查确认后,将塔体转体脱架,塔体完全离开胎架后即静置观察,静置时间约3 h。期间密切检查各传感器工作是否正常,油缸、液压泵站和计算机控制柜工作是否正常,各种备件、通讯工具是否完备;检查塔柱结构、转铰结构、锚点及临时撑杆结构体系等焊缝是否正常,结构的变形是否在允许的范围内。

(2)先竖转边跨侧塔柱,以靠中跨侧主塔立柱做为配重,计算机控制连接在中跨侧塔柱横梁上的6个对拉油缸开始同步提升,张拉拖起靠边跨侧塔柱,此时边跨侧主塔背索处于松掉状态。

(3)靠边跨侧主塔立柱竖转到位后,连接在中跨侧主塔横梁上的6个对拉油缸开始停止作业,处于静止状态;完成边跨侧主塔立柱与塔梁结合段的焊接,然后边跨侧塔柱背索开始张紧。

(4)边跨侧塔柱竖转完成后,开始竖转中跨侧塔柱。中跨侧塔柱竖转以已安装到位的边跨侧主塔立柱为张拉塔架,背索为后锚点,计算机控制连接在边跨侧塔柱横梁上的6个对拉油缸开始同步提升,张拉拖起中跨侧塔柱。

(5)靠中跨侧塔柱竖转到位后,连接在边跨侧塔柱横梁上的6个对拉油缸停止工作;完成中跨侧塔

柱与塔梁结合段的焊接,中跨侧塔柱竖转完成。

(6)在主塔竖转过程中,环口是缓慢就位的,通过在塔根部两侧面布置6道就位挡块来限制主塔环口就位的路径。就位挡块用30 mm厚钢板进行制作,在上部切成一个喇叭口,通过设置就位挡块可以有效地防止主塔竖转就位时产生左右偏位。

(7)在主塔竖转就位前,对拉钢绞线受力逐步减小,不利于对拉油缸施工控制。宜采用同步张拉背索的方法主动提供拉力。

5 结 语

在塔柱采用钢结构时,宜优先采用低位平面拼装,再竖向转体就位施工,可有效减少高空作业量,降低塔柱高处拼装作业的安全风险,也有利于现场钢结构施工质量的控制。竖向转体施工无需搭设大量承重支架、脚手架,从而减少大型吊装设备使用量,具有经济性好、施工进度快等优点。

中兴大桥V型主塔于2018年8月顺利完成竖转施工,安全无事故,质量符合设计与规范要求。其成功经验可为其它类似桥梁的施工提供借鉴。

参考文献:

[1] 上海市市政工程设计研究总院. 中兴大桥及接线(江南路—青云路)工程主桥施工图设计文件[R]. 2016.
[2] 宏润建设集团股份有限公司. 中兴大桥及接线(江南路—青云路)工程主塔竖转安装专项施工方案[R]. 2018.

(上接第122页)

为整体考虑的方法是可行的。

(2)以郑州西四环节段预制胶接拼装连续梁桥为工程背景,对桥梁施工过程中的受力进行计算分析,其全桥截面应力在施工过程中均为压应力,通过运营阶段受力分析,该节段拼装梁桥在不同荷载组合工况作用下受力合理,满足规范要求。

参考文献:

[1] 魏亚雄.节段拼装活性粉末混凝土箱梁桥力学性能与施工控制研

究[D].长沙:湖南大学,2015.

[2] DG/TJ 08-2255—2018, 节段预制拼装预应力混凝土桥梁设计标准[S].
[3] 李甲丁. 南京长江四桥节段预制拼装刚构体系与抗剪性能研究[D].南京:东南大学,2010.
[4] AASHTO.Guid Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges[S].
[5] 文畅霆.弯剪复合作用下节段预制胶拼体内预应力混凝土梁受力性能研究[D].北京:北京交通大学,2018.