

# 小半径曲线连续刚构特大桥 0 号块精细化 受力性能研究

王庆贺<sup>1</sup>, 边涛<sup>2</sup>, 吴欣荣<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038;  
3. 建筑结构学报编辑部, 北京 100835)

**摘 要** 目的 研究小半径曲线连续梁桥在荷载作用下 0 号块的受力情况, 比较分析 0 号块三种有限元模型, 即模型 A(模拟 0、1、2 号块)、模型 B(模拟 0、1 号块)、模型 C(仅模拟 0 号块)之间的差异, 给出合理的 0 号块有限元模型建立形式. 方法 以拉格斯轻轨跨海小半径曲线连续刚构特大桥为例, 基于大型有限元分析软件 Midas FEA 建立 0 号块精细化模型, 分析其在温度、预应力和施工荷载等最不利条件作用下的受力状态. 结果 由有限元软件分析结果可以看出, 0 号块受力复杂, 最小应力为  $-8.97 \text{ MPa}$ , 最大应力为  $1.29 \text{ MPa}$ ; 模型 C 与模型 A、B 所得应力结果相差较大; 0 号块周围块体对其应力影响较大, 在进行 0 号块的有限元模拟中不能忽略周围块体的影响. 结论 为减小不利因素对 0 号块的影响, 实际施工时应采取一定措施: 合理控制 0 号块混凝土浇筑温度; 合理控制 0 号块预应力张拉时间; 合理控制不平衡施工效应的影响.

**关键词** 连续刚构; 0 号块; 应力; 有限元分析; 受力性能

中图分类号 TU997

文献标志码 A

## Research on Mechanical Behavior of 0# Segment of Long-span Small Radius Curved Continuous Rigid-frame Bridge

WANG Qinghe<sup>1</sup>, BIAN Tao<sup>2</sup>, WU Xinrong<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Civil Engineering Construction Corporation, Beijing, China, 100038; 3. Journal of Building Structures Editorial Office, Beijing, China, 100835)

**Abstract:** To investigate the mechanical behavior of 0# segment of small radius curved continuous girder-frame bridges, three types of finite element models were proposed and their results were compared, i. e. model A (FE model including 0# segment, 1# segment and 2# segment), model B

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808351); 辽宁省高等学校基本科研项目(LJZ2017021); 辽宁省博士科研启动项目(2019-BS-193)

作者简介: 王庆贺(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构方面研究.

(FE model including 0# segment and 1# segment), and model C (FE model only including 0# segment). In this paper, based on the small radius continuous girder-frame bridge of the Lagrange light rail, the finite element model of 0# segment was built up by Midas FEA to analyze its stress state under the combined loads, such as temperature, prestress and construction load. It is shown that the stress distribution of 0# segment is complex, with the minimum stress of  $-8.97\text{ MPa}$  and the maximum stress of  $1.29\text{ MPa}$ . Comparing the results of model C with model A and model B, the stress obtained by model C is quite different from those of model A and model B, and the influence of the segments nearby on the stress of 0# segment should be taken into account in finite element analysis. Reasonable controls of casting concrete temperature, prestressing time of 0# segment, and unbalanced construction effects could be adopted to reduce the stress of 0# segment caused by the nearby segments.

**Key words:** continuous rigid-frame bridge; 0# segment; stress; FEA; mechanical behavior

曲线梁桥具有较好的线形适应性,能够有效地满足桥梁结构线路走向的需要<sup>[1-3]</sup>.但是曲线梁桥在外荷载作用下会出现弯扭耦合效应,这种效应致使结构受力状态变得复杂<sup>[4-6]</sup>.0号块是刚构桥的关键部位,其构造和受力较为复杂<sup>[7-10]</sup>,尤其在悬臂浇筑施工过程中0号块的受力状态需重点研究.众多学者针对刚构桥0号块受力进行了系列研究<sup>[11-14]</sup>;叶九发<sup>[15]</sup>针对连续刚构组合梁体系的双线铁路桥的0号块进行分析,结果表明,墩梁固结0号块受力复杂,处于空间应力状态,扭矩最大时底板处于不利状态;宫玉明<sup>[16]</sup>基于ANSYS软件对连续刚构桥的0号块进行了空间应力分析.通过分析得到该桥0号块的顶板和腹板主要承受压应力,底板主要承受拉应力;童智<sup>[17]</sup>针对红岩溪特大刚构桥的0号块施工过程,对其应力分布以及可能出现裂缝的位置进行分析,明确了结构在日照温度、收缩等条件作用下的主拉应力和变形,并指出主要影响因素;张晓莹<sup>[18]</sup>对某连续刚构桥0号块的受力状态进行了分析,并对分层高度、浇筑温度和线膨胀系数等对应力分布的影响进行了分析;许基厚等<sup>[19]</sup>针对主跨为210 m的大跨连续刚构桥0号块进行了研究,运用ANSYS软件分析得到其在承载能力极限状态与正常使用极限状态下的应力分布;燕海蛟和安永日<sup>[20]</sup>以某大跨连续刚构桥0号块为研究对象,选取施工阶段

及运营阶段的最不利工况进行应力分析.分析结果表明,0号块存在局部应力集中现象.上述研究中,部分分析仅建立了0号块模型,部分分析对0号块附近块体进行了模拟,但针对0号块附近块体(1、2号块)对0号块应力状态的影响缺少相关研究,这关系到0号块应力分析的准确性,应进行具体分析.

基于此,笔者以拉格斯轻轨跨海小半径曲线连续刚构特大桥为例,采用Midas FEA软件建立0、1、2号块的精细化分析模型,详细分析0号块各部位的受力特征,并提出相应的施工应对措施,并在此基础上,与仅建立0号块模型时所得结果进行对比,分析0号块附近块体对应力结果的影响.

## 1 研究背景

拉格斯轻轨跨Lagoon湖高架桥地处大西洋入海口,主桥全长379.7 m,采用 $(39.25+5\times60+39.25)\text{ m}$ 的刚构连续梁形式;主桥曲线半径小( $R=400\text{ m}$ ),线形控制困难.主桥结构为双线,线间距为4.2 m.采用2个双薄壁墩和2个矩形空心墩与梁固结,墩高均为10 m.连续墩及刚构墩处箱梁梁高4.3 m,跨中及边直段为2.8 m;截面顶宽9.1 m,底宽5.5 m.箱梁横截面为单箱单室直腹板;截面顶板厚40 cm,腹板厚度为45~110 cm,底板厚度30~70 cm;在连续墩处设2.4 m厚横隔板,刚构墩处设两道

1.2 m横隔板,梁端横隔板厚1.2 m,跨中设0.6 m横隔板.各跨箱梁沿跨度方向划分为17段,跨中为8号块,墩台处为0号块.0号块沿跨度方向长12 m,中部截面高4.3 m,端部截面高3.89 m,0号块尺寸及构造如图1所示.

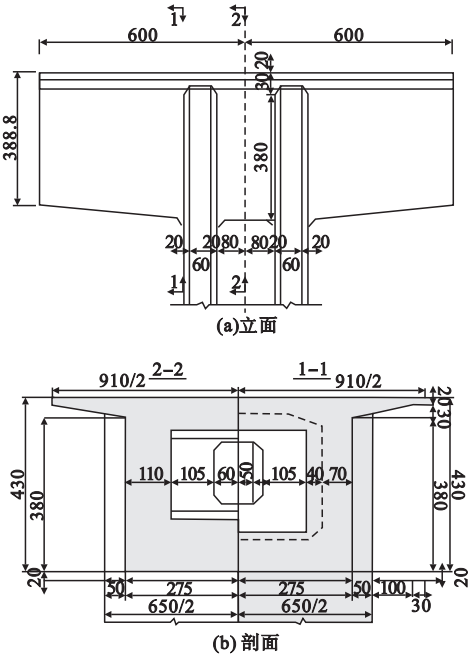


图1 0号块尺寸及构造

Fig.1 Illustration of 0# segment in this project

墩顶0号块采用支架法施工,施工支架采用贝雷片与型钢组合的结构形式,主要包括支撑钢管、承重梁和模板支撑.通过搭设模板、布置普通钢筋、浇筑混凝土和张拉预应力钢筋完成0号块施工,为主桥结构的挂篮悬臂浇筑施工提供条件.由于0号块内部结构设计复杂,混凝土施工进行分层浇筑,按先底板、腹板后顶板的顺序一次浇筑.

2 有限元模型的建立

2.1 模型简化

根据圣维南原理,0号块的受力状态与其附近区域的应力状态有关,远离0号块区域的应力状态对0号块的受力状态影响很小,一般可不予考虑.因此,采用 Midas FEA 中的实体单元建立0、1、2号块及墩的精细化

有限元模型(简称模型A),如图2所示.采用六面体单元划分,模型共包含实体单元33 145个,节点91 054个.分析中忽略普通钢筋、预应力钢筋的有利作用.由于0号块形状对称,因此仅建立1/2实体模型.

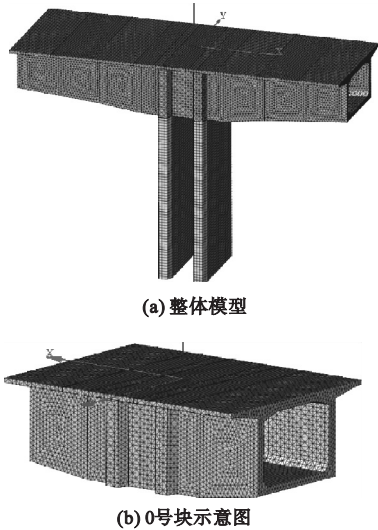


图2 有限元模型A

Fig.2 Finite element model for model A

梁体采用C50混凝土,按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018),弹性模量取 $3.45 \times 10^4$  MPa,泊松比取0.2.

2.2 边界及荷载施加

对0号块进行受力分析之前,采用 Midas Civil 软件对全桥施工过程进行有限元分析,计算梁体截面的弯矩、轴力、剪力,并将其转化为0号块分析的受力边界条件.取最不利的两种工况,具体取值如表1所示.

表1 工况I、II下梁端荷载取值

Table 1 Design load at beam ends for design I and II

工况	内力/MN			弯矩或扭矩/(kN·m)		
	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
I	45.3	0.74	-3.19	-4 169	-9 345	443
II	43.4	0.12	-3.01	2 544	-5 537	-392

注: $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 分别为x、y、z方向集中力; $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 分别为绕x、y、z方向弯矩.

为消除集中力及弯矩作用下的局部的应力集中,在2号块端部建立刚性段(刚性段刚度取为 $3.45 \times 10^{10}$  MPa),并将荷载作用在

刚性段上. 在梁端建立刚性段是为了使传递至节点梁端的荷载均匀, 作用于其端部的荷载的大小、方向及种类见表 1. 墩身底部采用固结边界条件, 0 号块对称中心采用对称边界, 边界条件施加如图 3 所示.

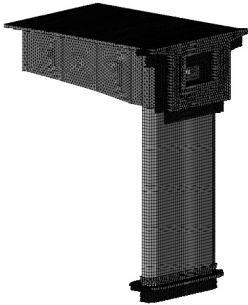


图 3 荷载及边界施加

Fig. 3 Load and boundary conditions in FEM

3 有限元结果及分析

3.1 0 号块应力结果

实体单元模型主要受应力控制, 混凝土结构主要以主拉应力计算结果作为拉应力控制因素, 以主压应力计算结果作为压应力控制因素. 在温度、预应力、施工荷载等外荷载综合影响下, 提取 0 号块最不利荷载作用下的应力状态云图, 如图 4 ~ 图 11 所示, 同时将 0 号块应力分析结果汇总见表 2. 在进行节点局部有限元分析之前, 针对全桥进行建模, 通过不同工况下全桥模型受力分析, 确定节点各梁端最不利荷载大小. 限于篇幅, 仅在 2.2 节开头处简要说明, 具体过程不再给出.

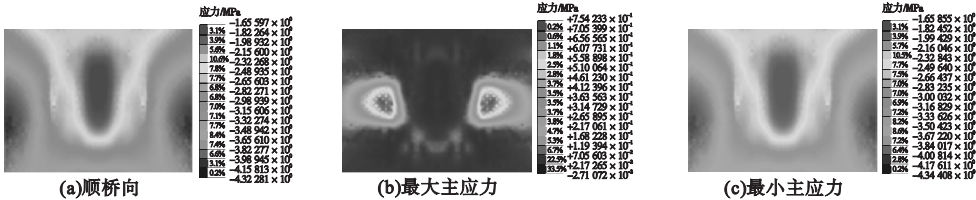


图 4 顶板应力云图(工况 I)

Fig. 4 Stress distribution in top flange under condition I

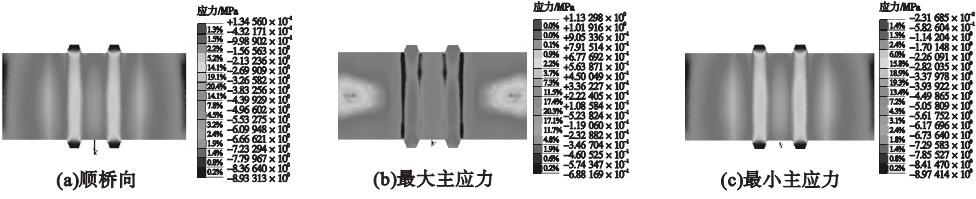


图 5 底板应力云图(工况 I)

Fig. 5 Stress distribution in bottom flange under condition I

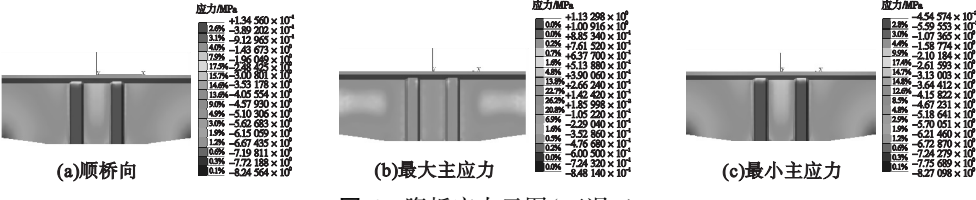


图 6 腹板应力云图(工况 I)

Fig. 6 Stress distribution in web under condition I

顶板处于复杂受力状态, 整体以受压为主, 沿桥向压应力最大为 4.32 MPa, 最小为 1.66 MPa; 底板由于弯扭作用, 出现拉应力, 底板与墩身连接位置受力最为不利, 在使用

过程中应予以重点关注, 第一主应力最大为 1.19 MPa, 最小为 -0.69 MPa; 腹板下部以受压为主, 上部以受拉为主, 最大应力为 1.19 MPa, 最小应力为 -0.85 MPa; 横隔板



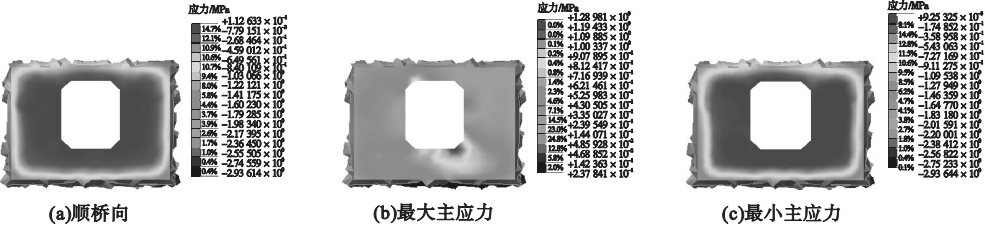


图7 横隔板应力云图(工况 I)

Fig. 7 Stress distribution in diaphragm under condition I

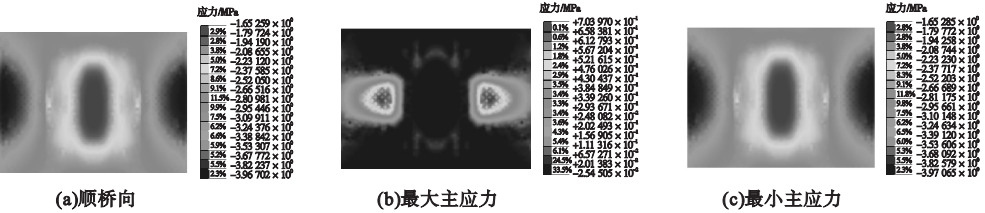


图8 顶板应力云图(工况 II)

Fig. 8 Stress distribution in top flange under condition II

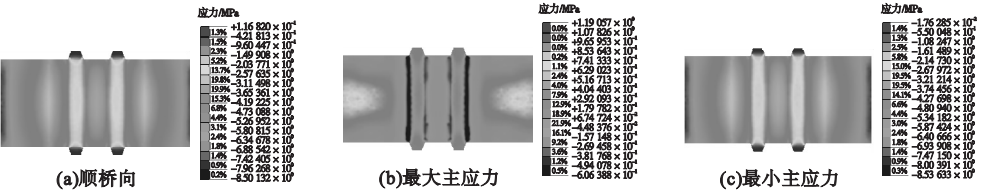


图9 底板应力云图(工况 II)

Fig. 9 Stress distribution in bottom flange under condition II

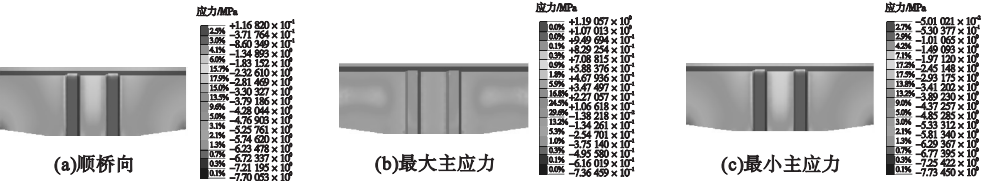


图10 腹板应力云图(工况 II)

Fig. 10 Stress distribution in web under condition II

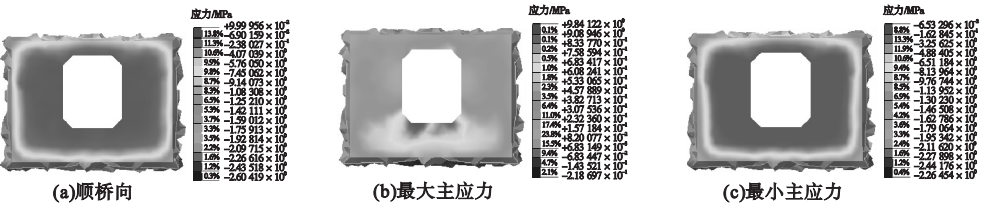


图11 横隔板应力云图(工况 II)

Fig. 11 Stress distribution in diaphragm under condition II

表 2 应力计算结果汇总表  
Table 2 Summary of stress results

工况编号	部位	顺桥向应力/MPa		最大主应力/MPa		最小主应力/MPa	
		最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
工况 I	顶板	-1.66	-4.32	0.75	0.02	-1.66	-4.34
	底板	0.13	-8.93	1.13	-0.69	-0.02	-8.97
	腹板	0.13	-8.25	1.13	-0.85	-0.05	-8.27
	横隔板	0.11	-2.94	1.29	-0.24	0.09	-2.94
工况 II	顶板	-1.85	-3.97	0.70	-0.03	-1.65	-3.97
	底板	0.01	-8.50	1.19	-0.61	-0.02	-8.54
	腹板	0.11	-7.70	1.19	-0.74	-0.05	-7.73
	横隔板	0.09	-2.60	0.98	-0.21	0.00	-2.60

在中间孔洞边缘处受力较为不利,横隔板最大应力为 1.29 MPa,最小应力为 -0.24 MPa.

3.2 不同模型结果对比

为对比 1、2 号块对 0 号块应力模拟结果的影响,建立仅有 0、1 号块的模型 B 及仅包含 0 号块的模型 C,可得不同模型下 0 号块应力分布.以顶板顺桥向应力、最大主应力、最小主应力分布为例进行对比,如图 12 ~ 图 14 所示.由图可见,模型 A 和模型 B 分析所得 0 号块应力分布较为相似,所得最大、最小

应力差异较小;而与模型 C 所得应力分布差异较大,模型 C 与 1 号块相连部位,局部应力较高,远离与 1 号块的连接部位,应力迅速减小,模型 A、B、C 与 1 号块相连部位最大主应力分别为 -0.027 MPa、-0.054 MPa、-1.59 MPa,可见模型 C 与模型 A、B 分析结果差异较大.采用模型 C 所得的应力结果,端部局部应力较大,这与端部局部加载有关.由对比可知,0 号块应力分析模型中应对附近块体进行模拟,以消除由于荷载引起的应力集中现象.

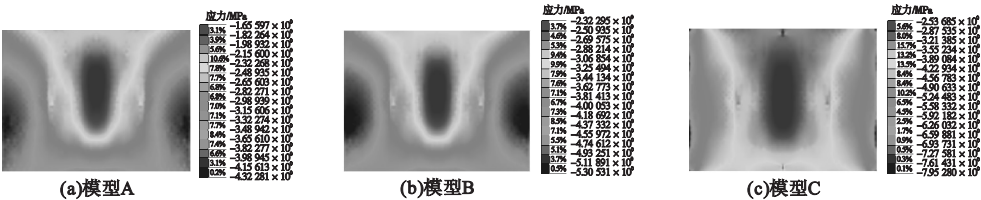


图 12 顺桥向应力对比

Fig. 12 The comparison of stress along the bridge span

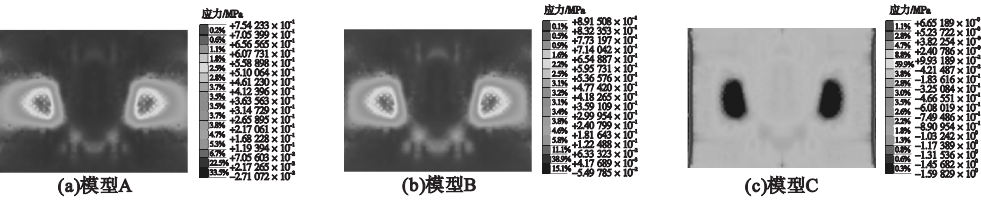


图 13 最大主应力对比

Fig. 13 The comparison of maximum stress

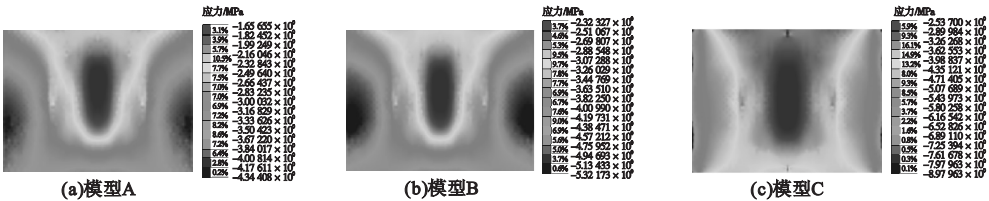


图 14 最小主应力对比

Fig. 14 The comparison of minimum stress

3.3 施工措施

通过0号块精细化有限元模型分析,可知结构底板与墩身相交部位的受力状态最为不利.因此,结合0号块和小半径曲线连续刚构桥整体结构的施工过程,提出以下施工控制措施.

(1)合理控制0号块混凝土浇筑温度.主桥结构地处热带雨林气候,平均最高温度为30℃左右,平均最低温度为24℃左右.通过控制混凝土入模温度,加强混凝土养护,可有效降低0号块温度应力的不利影响.

(2)合理控制0号块预应力张拉时间.0号块处于复杂的三向预应力状态,合理的横向、纵向、竖向预应力的张拉批次和张拉时间,将有效控制0号块的应力状态.

(3)合理控制不平衡施工效应的影响.受小半径曲线的影响,桥梁整体结构悬臂浇筑过程中,0号块的受力状态处于不断变化的过程中,一直处于不平衡受力状态中,弯扭耦合作用和剪力滞效应对0号块受力性能的影响逐渐凸显,应加强0号块应力状态的监测,通过采取合理的配重、调整施工步骤等措施,合理控制不平衡施工效应对0号块应力状态的影响.

4 结 论

(1)连续刚构桥0号块处于三向预应力作用下,应力分布规律复杂;在最不利荷载作用下,底板与墩身相交部位处于最不利状态,施工过程中应加强相应部位的应力监测,确保结构安全.

(2)通过与仅模拟0号块及模拟0、1号

块的模型进行对比可知,仅模拟0号块时,端部受荷载影响较大,在0号块有限元应力分析中,应考虑其附近块体的影响.

(3)建议采取合理控制混凝土浇筑温度、三向预应力张拉时间、合理控制不平衡施工效应等措施,优化0号块应力状态.

参考文献

[1] 谢明志,杨永清,李晓斌,等.不同大跨高铁连续梁悬臂施工变形研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(1):26-35.  
(XIE Mingzhi, YANG Yongqing, LI Xiaobin, et al. Deformation analysis of cantilever construction of different long-span continuous girder bridges for high-speed railway [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(1): 26-35.)

[2] 李勇,朱崇利,查晓雄,等.汉江特大桥结构选型及上部结构设计优化[J].建筑结构学报,2015,36(增刊1):134-138.  
(LI Yong, ZHU Chongli, ZHA Xiaoxiong, et al. Structural selection and superstructure optimal design of the Han River extra-large bridge [J]. Journal of building structures, 2015, 36(S1): 134-138.)

[3] 包龙生,肖成忠,于玲,等.大跨度混凝土连续梁桥施工监控参数敏感性分析方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(6):114-119.  
(BAO Longsheng, XIAO Chengzhong, YU Ling, et al. The research of the sensibility analysis of design parameters in long-span concrete continuous girder bridge construction monitoring [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(6): 114-119.)

[4] 贾荣昌,张彬,朱静.行波效应下系梁设置对薄壁刚构桥地震响应影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(10):1059-1064.  
(JIA Rongchang, ZHANG Bin, ZHU Jing. Earthquake response of the rigid-frame bridge thin-wall with tie beam under traveling wave effect [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2017, 36(10): 1059-1064.)

[5] 薛刚,孙晓燕,白纬宇.变截面连续箱梁桥温

- 度场及其效应的有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(10): 1132-1137.  
(XUE Gang, SUN Xiaoyan, BAI Weiyu. Finite element analysis for temperature field and its effect of cross-section continuous box girder bridge [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2016, 35(10): 1132-1137.)
- [6] 贾毅, 赵人达, 李友河, 等. 高墩大跨连续刚构桥静动载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 470-478.  
(JIA Yi, ZHAO Renda, LI Youhe, et al. Static and dynamic load tests for high-pier long span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science) 2019, 35(3): 470-478.)
- [7] 陈建强, 纪洪广. 大型异形组合结构抗震性能[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(8): 819-824.  
(CHEN Jianqiang, JI Hongguang. Seismic behavior of lager special-shaped composite structure [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2017, 36(8): 819-824.)
- [8] 唐杨. 环境温度对单薄壁墩连续刚构0#块水化热的影响[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(2): 23-28.  
(TANG Yang. The effect of the ambient temperature on the hydration heat of block 0# of a continuous rigid frame with thin-walled piers [J]. Traffic engineering and technology for national defense, 2019, 17(2): 23-28.)
- [9] 宋福春, 陈冲, 张兴, 等. BIM技术在大跨度斜拉桥设计中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016(1): 115-123.  
(SONG Fuchun, CHEN Chong, ZHANG Xing, et al. Application of BIM technology in long span cable-stayed bridge design [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016(1): 115-123.)
- [10] WANG Lifeng, JIANG Hongwei, HE Dongpo. The application of the grey neural network in the deflection control of PC rigid frame continuous box girder bridges [J]. Open civil engineering journal, 2014, 8(2): 416-419.
- [11] XIA He, ZHANG Nan. Experimental analysis of railway bridge under high speed trains [J]. Journal of sound & vibration, 2015, 282(2): 517-528.
- [12] LEANDE R J, ANDERSON A. Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge [J]. Engineering structures, 2010, 32(3): 854-863.
- [13] 宋福春, 王瑜. 轨道交通荷载作用下单双箱梁桥空间振动研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(5): 22-30.  
(SONG Fuchun, WANG Yu. The research on space vibration of single and double girder bridges under rail traffic loads [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2011, 27(5): 22-30.)
- [14] ZENG Y. Bridge structure performance evaluation based on dynamic load test [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 238(6): 694-696.
- [15] 叶九发. 曲线连续刚构桥0号块实体分析研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(6): 69-73.  
(YE Jiufa. Analysis on No. 0 segment of curved continuous rigid-framed bridge [J]. High speed railway technology, 2015, 6(6): 69-73.)
- [16] 宫玉明. 连续刚构桥0号块空间应力分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 83-87.  
(GONG Yuming. Analysis on space stress of block No. 0 of continuous rigid frame bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 33(6): 83-87.)
- [17] 童智. 大跨PC连续刚构桥0#块应力分析与改进措施[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.  
(TONG Zhi. Stress analysis and improvement measures of 0# block in long span PC continuous rigid frame bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2016.)
- [18] 张晓莹. 大跨度连续刚构桥0号块结构施工过程受力分析及控制措施[J]. 广东公路交通, 2017, 43(4): 79-81.  
(ZHANG Xiaoying. Mechanical analysis and control measures for block No. 0 of large span continuous rigid frame bridge [J]. Guangdong highway communications, 2017, 43(4): 79-81.)
- [19] 许基厚, 王成, 唐自航, 等. 大跨连续刚构桥零号块力学性能分析[J]. 工程结构, 2018, 38(3): 159-162.  
(XU Jihou, WANG Cheng, TANG Zihang, et al. Mechanical properties of block No. 0 of large-span rigid frame bridge [J]. Sichuan architecture, 2018, 38(3): 159-162.)
- [20] 燕海蛟, 安永日. 大跨连续刚构桥0号块空间应力分析[J]. 公路交通技术, 2018, 34(2): 37-43.  
(YAN Haijiao, AN Yongri. Analysis on spatial stress of block 0 of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Technology of highway and transport, 2018, 34(2): 37-43.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)