

35 m/800 t 非对称整孔箱梁分幅架设试验研究

蔡煜梁¹, 吕忠达^{1,2*}, 赵卓², 张军豪³, 杨黎明¹

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315211;
3. 通号(郑州)电气化局郑州铁路工程有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 宁波某高速公路工程项目采用“单车跨双幅梁上运梁, 架桥机左右分幅架设 35 m/800 t 非对称整孔箱梁”技术方案。鉴于该技术方案为国内外首次采用, 特开展架设施工过程中承压箱梁受力状态的试验测试和数值模拟分析。研究结果表明: 架设施工过程中, 最不利工况为运梁车运梁到位工况; 最不利位置出现在跨中截面短翼缘侧底腹板交界处; 且承压箱梁底板短翼缘侧纵向拉应力变化普遍大于长翼缘侧, 存在一定的偏载效应, 在施工过程中需引起注意; 承压箱梁横向最大拉应力变化出现在箱梁横移到位, 架桥机中支腿支点附近, 此时架桥机中支腿荷载达到最大值; 整体而言, 承压箱梁混凝土应力未超限, 运、架施工工艺安全可靠, 并且架设效率高, 值得类似工程借鉴和推广。

关键词: 非对称; 大吨位; 预制箱梁; 架设试验; 有限元计算

中图分类号: U445.46

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 03-0067-07

大吨位箱梁的预制、架设起源于意大利^[1]。由于大吨位整孔预制箱梁具有整体刚度大、施工速度快、连接接头少、工程质量和耐久性好等特点^[2-4], 在工程中得到越来越广泛的应用。

早在 20 世纪 90 年代, 随着东亚高速铁路的建设, 大吨位混凝土整孔预制箱梁制运架技术及配套设备不断发展^[5]。韩国东部公司在汉城(现称首尔)至釜山高速铁路施工中曾预制 25 m/600 t 混凝土整孔箱梁 367 孔, 采用 600 t 轮胎式运梁车梁上运梁, 并引进意大利尼古拉公司 750 t 架桥机进行架设, 每月制、架进度为 20 孔^[5]。

在我国铁路桥梁建设中, 推荐梁式为 32 m/900 t 整孔预制箱梁, 由于铁路运营荷载较大, 因而箱梁设计承载能力较高, 施工过程中一般采用单车跨单幅梁上运梁, 国产架桥机进行单幅箱梁架设施工^[6-8]。在我国公路桥梁建设中, 由于箱梁和运梁车总重远远超过运营期车辆荷载, 采用梁上运梁、梁上架设施工方案就必须对施工工艺作出改

进。针对这一点, 杭州湾跨海大桥工程率先提出四车跨双幅梁上运梁、LGB1600 型步履式架桥机进行 50 m/1 430 t 整孔预制箱梁的分幅架设施工^[9-13]。后来这一工艺逐渐被上海东海大桥、舟山金塘大桥、青岛海湾大桥以及上海长江大桥等大型桥梁建设工程采用^[14]。

依托宁波某高速公路工程项目, 为在既有道路上修建高架桥, 受已有道路中央分隔带宽度限制, 该工程下部结构采用外扩式花瓶墩, 上部结构采用 35 m/800 t 非对称整孔预制箱梁。针对该项目特点, 于国内外首次提出“单车跨双幅梁上运梁、架桥机左右分幅架设”技术方案。鉴于该方案的新颖性, 非对称箱梁结构受力较为复杂^[15-17], 且无类似工程经验可供借鉴, 为了保证架设施工过程的安全, 通过预埋在承压箱梁内部的传感器, 跟踪测试不同工况下承压箱梁的受力状态, 从而明确非对称箱梁的受力特点和架设施工最不利工况, 验证架梁技术方案的可行性。

收稿日期: 2018-10-26.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市桥梁技术科技创新团队(2014B81003)。

第一作者: 蔡煜梁(1993-), 男, 浙江湖州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁工程。E-mail: 397054694@qq.com

*通信作者: 吕忠达(1963-), 男, 浙江奉化人, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 桥梁工程。E-mail: lzd@189.cn

1 架设施工工艺

非对称箱梁架设施工主要由 1 台 YL850 型运梁车和 1 台 JQ850 型架桥机配合完成. JQ850 型架桥机中支腿断面如图 1 所示. 架梁作业时, 中支腿作为刚腿克服架桥机水平荷载和弯矩, 其上部与机臂通过插销装置铰接, 下部与吊孔通过锚固装

置固结. 中支腿下部采用均衡梁, 以实现各支撑点载荷均匀分配, 避免梁片受力不均而受损. JQ850 型架桥机在架设箱梁状态时, 中支腿位于已架箱梁上, 中支腿中心线距桥墩中心线 1.80 m, 中支腿支撑分配梁横向中心距 10.95 m.

箱梁架设过程中, 各关键工况如图 2 所示. 预制箱梁架设时, 步履式架梁机先运行至架梁工位,

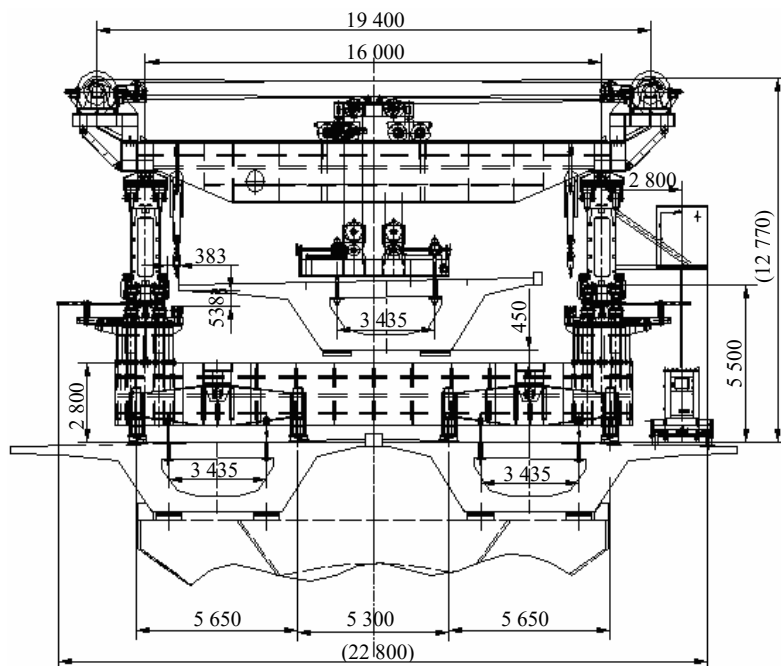


图 1 JQ850 型架桥机中支腿断面(mm)

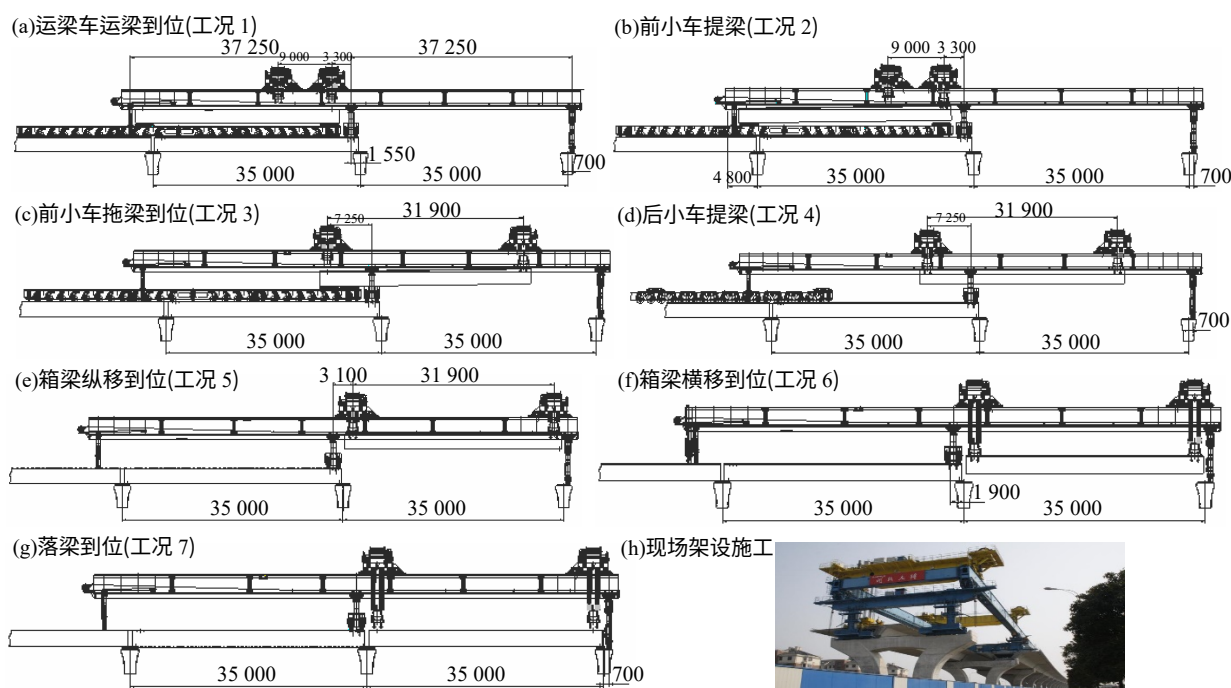


图 2 箱梁架设过程中各关键施工工况(mm)

然后依次经过: (1)运梁车运梁驶入架桥机尾部喂梁; (2)架桥机前起重小车取梁后与运梁车后驮梁台车同步纵移前行; (3)预制箱梁拖拉至架桥机后起重小车下方, 后起重小车取梁; (4)两台起重小车同步提梁至高位后, 靠架桥机主梁上方的拖拉卷扬, 驱动前、后天车提梁同步纵移前行; (5)纵移到位后将箱梁降至低位; (6)天车提梁横移到位; (7)最后落至已安装的临时支座上。

2 试验测试方案

2.1 试验方法

选取边跨右幅 35 m 承压箱梁为试验对象, 在架桥机架设次边跨右幅 35 m 箱梁时, 进行图 2 所示关键工况的试验数据采集。

试验承压箱梁混凝土应变测试采用预埋式混凝土应变计, 并通过综合采集仪采集混凝土应变及温度数据。考虑温度修正后得到混凝土应力变化值。

将采集到的数据进行分析处理后, 得到各工况下承压箱梁的受力状态, 从而明确架设施工最不利工况, 并判断有无施工风险。

2.2 测点布置

非对称箱梁采用单箱单室截面, 试验梁标准跨径为 35 m。非对称箱梁结构典型横断面如图 3 所示。箱梁顶宽 12.45 m, 底宽 4.55 m, 外侧悬臂 3.8 m, 内侧悬臂 1.7 m, 内外悬臂差 2.1 m。设计采用 C50 混凝土, HRB400 普通钢筋。纵向预应力钢束采用 8

束 19- ϕ^s 15.2 腹板束, 每腹板 4 束, 横向单排, 同时设置 3 束 14- ϕ^s 15.2 底板束。由于桥面板悬臂最大达到 3.8 m, 为满足受力需要, 横向设置有 4- ϕ^s 15.2 桥面板钢束, 纵向间距 60 cm。锚下终张拉控制应力 $\sigma_{con}=1\ 395$ MPa。单幅箱梁总重约 800 t。

根据前期计算分析和非对称箱梁结构设计特点, 本次试验共选取 6 个控制断面, 如图 4 所示。其中, 3-3 为跨中截面, 6-6 为架桥机中支腿截面, 其余截面为箱梁腹板变截面处。各控制断面纵、横向应力测点布置如图 5 和图 6 所示。

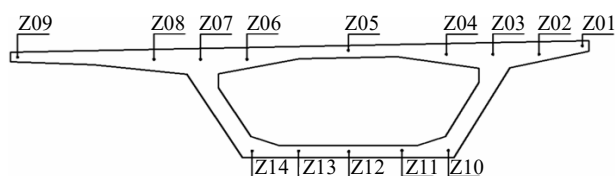


图 5 各截面纵向应力测点布置

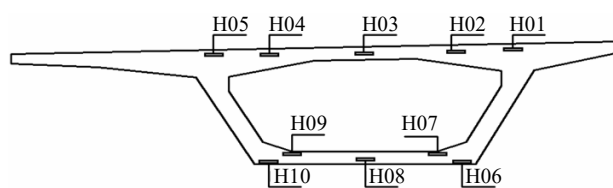


图 6 各截面横向应力测点布置

3 试验结果分析

应力测试以架桥机就位为初始状态(此时承压箱梁受自重、预应力以及中支腿荷载作用, 根据计算及现场测试结果, 跨中截面底板纵向存在 6 MPa 左右的预压应力, 顶板横向存在 3 MPa 左右的预压

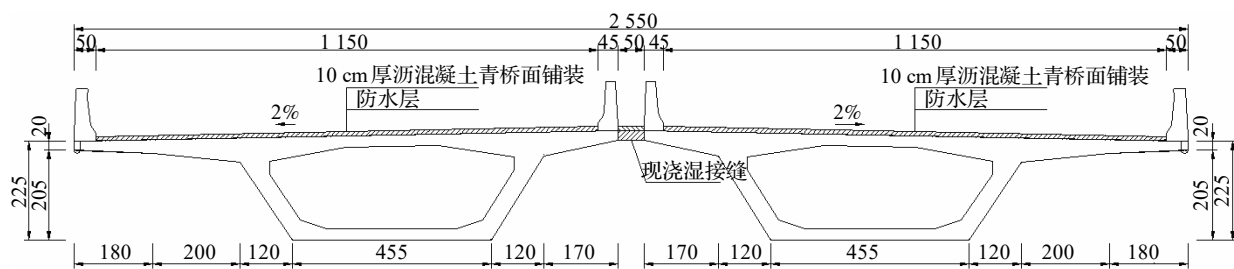


图 3 非对称箱梁结构典型横断面(cm)

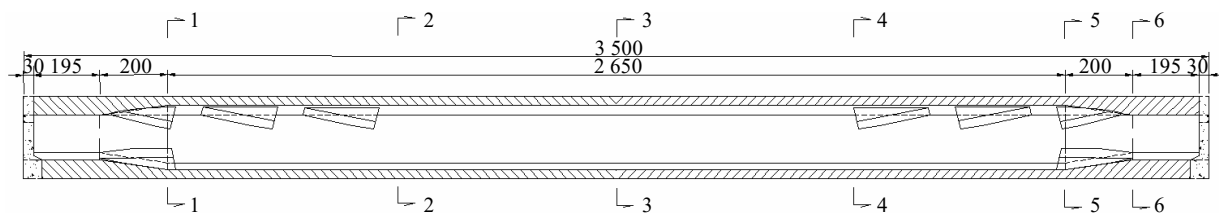


图 4 35 m 承压梁应力控制截面(cm)

应力), 并规定混凝土受拉为正, 受压为负.

3.1 非对称箱梁纵向应力分析

各关键工况下, 承压箱梁纵向最大拉、压应力变化及出现位置见表 1. 由表 1 可知: 非对称箱梁纵向最大拉应力变化为 4.76 MPa, 出现在工况 1 跨中截面短翼缘侧底腹板交界处(3-Z10 测点). 纵向最大压应力变化为 -3.19 MPa, 出现在工况 1 跨中截面短翼缘侧顶腹板交界处(3-Z03 测点). 因此, 架设施工最不利工况为运梁车运梁到位(工况 1). 根据计算分析及现场箱梁预应力张拉测试结果, 架设初始状态承压箱梁跨中截面底板纵向存在 6 MPa 左右的预压应力, 因此判定承压箱梁在架设施工过程中混凝土纵向应力无超限.

表 1 承压箱梁纵向最大应力变化及对应测点

工序	工况	最大拉应力点		最大压应力点	
		应力变化/ MPa	测点	应力变化/ MPa	测点
1	运梁车运梁到位	4.76	3-Z10	-3.19	3-Z03
2	前小车提梁	4.07	3-Z10	-1.88	3-Z03
3	前小车拖梁到位	3.89	3-Z10	-2.40	3-Z02
4	后小车提梁	3.04	3-Z10	-1.61	3-Z03
5	箱梁纵移到位	2.77	3-Z10	-1.88	3-Z03
6	箱梁横移到位	1.75	2-Z10	-1.88	3-Z03
7	落梁到位	0.99	5-Z13	-1.11	5-Z03

将工况 1 测得的各截面纵向应力测点数据进行数据拟合后, 绘制承压箱梁底板及顶板在该工况下的三维应力分布如图 7 和图 8 所示. 由图可知:

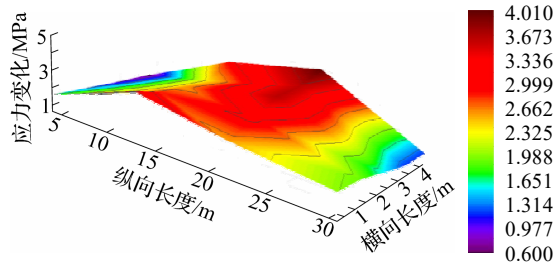


图 7 工况 1 承压箱梁底板整体纵向应力变化

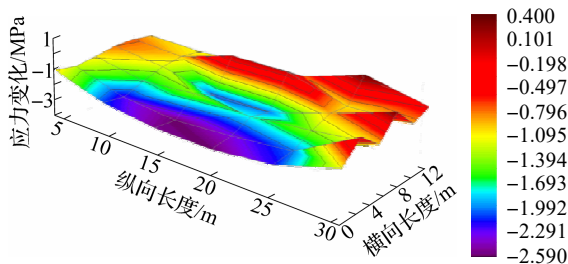


图 8 工况 1 承压箱梁顶板整体纵向应力变化

承压箱梁受力最不利截面为跨中截面, 最不利位置为跨中截面短翼缘侧底腹板交界处.

承压箱梁纵向受力最不利的短翼缘侧底腹板交界处, 各纵向测点在各工况下的应力变化如图 9 所示. 由图 9 可知: 各工况下承压箱梁底腹板各测点以受拉为主, 最大拉应力变化出现在跨中 3-3 截面附近, 且最大纵向拉应力随架设工序逐渐减小.

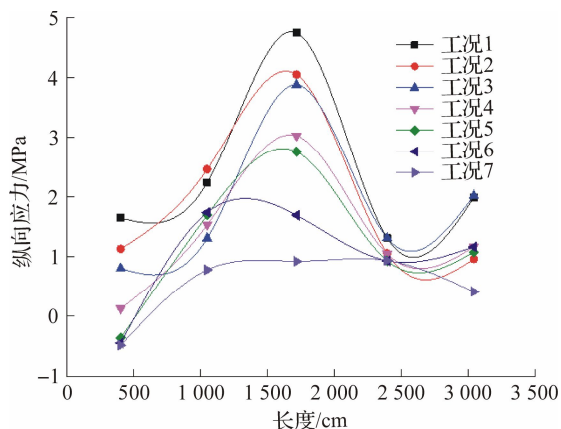


图 9 短翼缘侧底腹板交界处纵向应力变化

针对承压箱梁跨中截面, 其底板各测点沿箱梁宽度方向在各工况下的应力变化如图 10 所示. 由图 10 可知: 承压箱梁底板在各工况下均承受拉应力, 且受运梁车单侧轮压荷载效应影响, 承压箱梁底板短翼缘侧拉应力普遍大于长翼缘侧, 存在一定的偏载效应, 在施工过程中需引起注意.

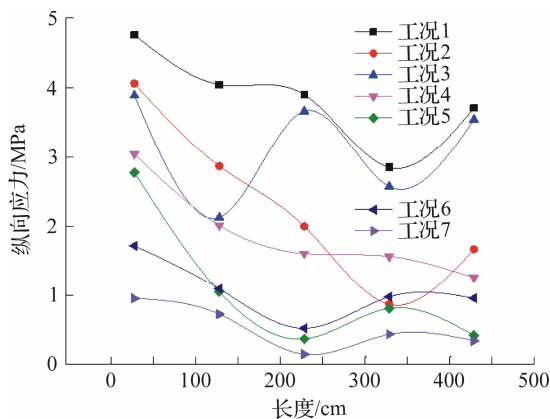


图 10 跨中截面底板沿宽度方向纵向应力变化

3.2 非对称箱梁横向应力分析

各关键工况下, 承压箱梁横向最大拉、压应力变化及出现位置见表 2. 由表 2 可知: 非对称箱梁横向最大拉应力变化为 1.90 MPa, 出现在箱梁横移到位(工况 6), 架桥机中支腿截面内侧支点附近

(6-H02 测点). 承压箱梁横向压应力整体变化不大. 根据计算分析及现场箱梁预应力张拉测试结果, 架设初始状态承压箱梁顶板横向存在 3 MPa 左右的预压应力, 因此判定承压箱梁在架设施工过程中混凝土横向应力无超限.

表 2 承压箱梁横向最大应力变化及对应测点

工序	工况	最大拉应力点		最大压应力点	
		应力变化/ MPa	测点	应力变化/ MPa	测点
1	运梁车运梁到位	1.84	3-H03	-0.91	6-H04
2	前小车提梁	1.33	3-H03	-0.69	6-H04
3	前小车拖梁到位	1.20	3-H02	-0.61	6-H04
4	后小车提梁	1.10	3-H03	-0.43	6-H01
5	箱梁纵移到位	0.95	6-H02	-0.30	6-H01
6	箱梁横移到位	1.90	6-H02	-0.65	6-H01
7	落梁到位	0.76	6-H02	-0.39	6-H04

将工况 6 测得的各截面横向应力测点数据进行数据拟合后, 绘制承压箱梁顶板在该工况下的三维应力分布如图 11 所示. 由图 11 可知: 承压箱梁顶板横向应力在中支腿和 2-2 截面处变化较大.

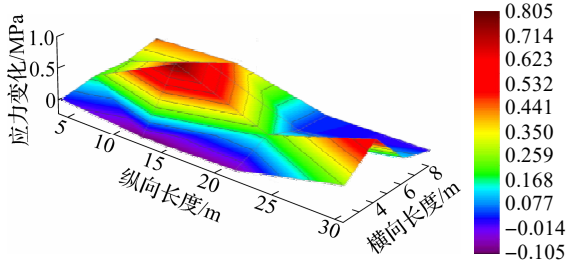


图 11 工况 6 承压箱梁顶板整体横向应力变化

针对横向受力较为不利的架桥机中支腿截面, 其承压箱梁顶板横向平均应力变化情况如图 12 所示

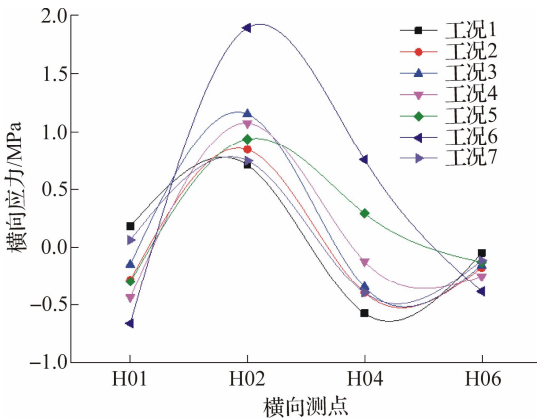


图 12 中支腿截面顶板横向应力变化

示. 由图 12 可知: 在箱梁横移到位(工况 6)时, 架桥机中支腿截面承压箱梁顶板全部受拉, 且横向拉应力变化明显大于其他工况. 其原因是施工过程中架设荷载分配, 中支腿荷载传递偏向箱梁横移一侧, 致使作用于承压箱梁顶腹板的施工荷载较大, 但横向应力总体未超限.

4 数值模拟分析

4.1 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 建立混凝土箱梁有限元模型. 箱梁混凝土采用 Solid 45 单元模拟; 运梁车车轮荷载采用面荷载模拟. 计算分析以运梁车驶入箱梁前, 架桥机就位为初始状态. 建立的有限元模型见图 13. 截面单元划分见图 14.

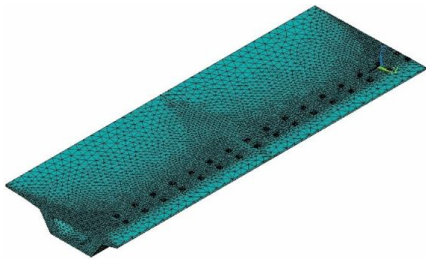


图 13 有限元模型

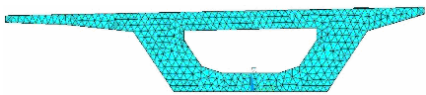


图 14 截面单元划分

4.2 计算结果分析

通过有限元软件计算承压箱梁在各工况下的应力变化情况, 提取最大值与实测结果进行对比(表 3). 由表 3 可知: 理论分析结果与试验测试结果基本一致, 最不利工况为运梁车运梁到位, 最不利位置出现在跨中截面短翼缘侧底腹板交界处.

表 3 承压箱梁纵向应力计算与实测结果对比

应力变化	计算值/ MPa	测试值/ MPa	工况	位置
最大拉应力	4.57	4.76	运梁车	跨中短翼缘侧
			运梁到位	底腹板交界处
最大压应力	-3.27	-3.19	运梁车	跨中短翼缘侧
			运梁到位	顶腹板交界处

承压箱梁在最不利工况下的顶、底板纵向应力变化分析结果分别如图 15 和图 16 所示.

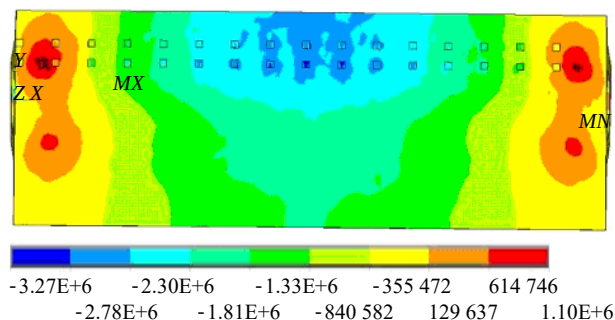


图 15 顶板纵向应力(Pa)

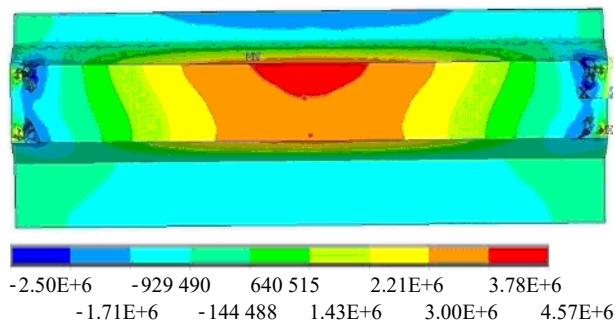


图 16 底板纵向应力(Pa)

由图 15 可知:在最不利工况下,承压箱梁顶板纵向除支座区域外,基本承受压应力,最大压应力变化为 -3.27 MPa 。由图 16 可知:承压箱梁底板纵向除支座区域外,基本承受拉应力,最大拉应力变化为 4.57 MPa ,且存在较为明显的偏载效应。

承压箱梁顶板在箱梁横移到位工况下横向应力变化如图 17 所示。中支腿截面横向应力变化如图 18 所示。

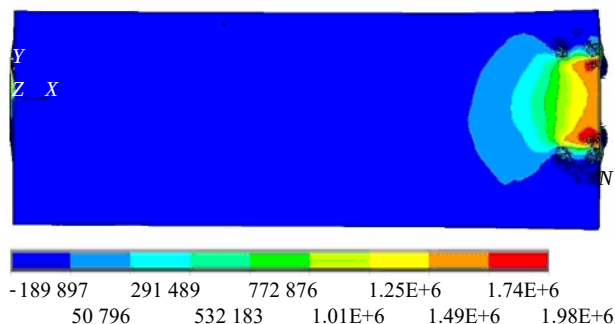


图 17 顶板横向应力(Pa)

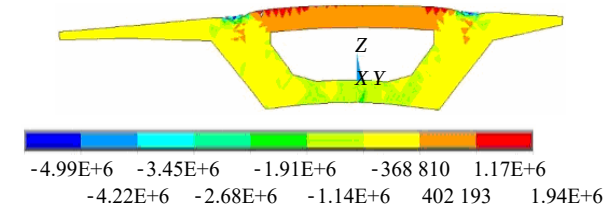


图 18 底板横向应力(Pa)

由图 17 可知:在箱梁横移到位时,承压箱梁顶板受力集中在中支腿附近,横向最大拉应力变化为 1.98 MPa 。由图 18 可知:受中支腿荷载影响,承压箱梁底板有上拱趋势。

5 结论

本文通过对国内外首次提出的“单车跨双幅梁上运梁,架桥机左右分幅架设”技术方案进行了现场试验测试和数值模拟分析,研究了关键工况下承压箱梁的受力情况,并得出以下结论:

(1)非对称箱梁架设施工过程中,承压箱梁混凝土应力无超限,测试结果与数值模拟结果吻合良好,架设施工工艺安全可靠。

(2)在箱梁架设过程中,承压箱梁纵向受力最不利工况为运梁车运梁到位。此时,纵向最大拉应力变化出现在跨中截面短翼缘侧底腹板交界处,且箱梁底板短翼缘侧纵向拉应力变化普遍大于长翼缘侧,存在较为明显的偏载效应。

(3)承压箱梁横向最大拉应力变化出现在箱梁横移到位,架桥机中支腿支点附近,此时架桥机中支腿荷载达到最大值。

(4)实践证明,“单车跨双幅运梁、双向运架梁”施工工艺安全环保,经济高效,适用于周边既有交通量较大或者土地资源受限等情况,并对工期有严格要求的高架桥工程具有较为明显的优势,值得类似工程借鉴和推广。

参考文献:

- [1] 王立军. 铁路客运专线大吨位预制箱梁制、移、运、架施工技术[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [2] Bujňáková P, Strieška M. Development of precast concrete bridges during the last 50 years in Slovakia[J]. Procedia Engineering, 2017, 192:75-79.
- [3] 王飞, 吕忠达, 徐爱敏, 等. 运梁车单车跨双幅非对称预制箱梁偏心运梁试验[J]. 桥梁建设, 2017, 47(6):66-71.
- [4] Moon D Y, Sim J, Oh H. Practical crack control during the construction of precast segmental box girder bridges [J]. Computers and Structures, 2005, 83:2584-2593.
- [5] 武凤远. 高速铁路、客运专线预应力混凝土简支箱梁分析试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [6] 刘辉, 秦顺全. 高速铁路 900 t 级常用跨度桥梁建造技术[J]. 铁路工程学报, 2009(2):60-63.

- [7] 郑健. 中国高速铁路桥梁建设关键技术[J]. 中国工程科学, 2008, 10(7):18-27.
- [8] 刘家铎. 我国铁路客运专线中小跨度简支箱梁架设方法综述[J]. 铁道标准设计, 2010(6):42-47.
- [9] 吕忠达. 杭州湾跨海大桥关键技术研究及实施[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6):78-82.
- [10] 李友明, 刘乃生, 林原. 杭州湾跨海大桥滩涂区 50 m 箱梁施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2006(3):42-46.
- [11] 吕忠达, 高志勇, 程德林, 等. 大型整体预制箱梁的运输架设[J]. 桥梁机械与施工技术, 2006(12):45-47.
- [12] 刘乃生, 张权, 杨勇. 1 500 吨级整孔预制箱梁运输方案研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(6):20-23.
- [13] 赵剑发, 王毅, 谭国顺. 海上大型预应力混凝土箱梁整孔预制与架设技术[J]. 桥梁建设, 2006(3):37-41.
- [14] 张军豪. 非对称大吨位预制箱梁分幅架设试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [15] Wang H L, Feng G Q, Qin S F. Hysteretic behavior of prestressed concrete bridge pier with fiber model[J/OL]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:467350 [2017-08-09]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/467350>.
- [16] 张玲. 铁路箱梁运架施工受力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6):1317-1320.
- [17] 张杰. 大跨预制箱梁分幅架设施工过程中花瓶形桥墩空间受力分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4):156-161.

Experimental study on erection of 35 m/800 t asymmetric whole span box girder

CAI Yu-liang¹, LÜ Zhong-da^{1,2*}, ZHAO Zhuo², ZHANG Jun-hao³, YANG Li-ming¹

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China;

3.General Number (Zhengzhou) Electrification Bureau Zhengzhou Railway Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: A highway project in Ningbo attempts to adopt the technical scheme of “one girder-transport-vehicle transports box girder across the left and right decks and the bridge machine erects the 35 m/800 t asymmetric whole span box girder”. In view of the first application of this technical scheme at home and abroad alike, this paper investigates the forced state about pressure bearing box girder during the erection by both experimental test and numerical simulation analysis. The results showed that the worst working condition during the erection is transporting the box girder to designed position. The junction of short flange and bottom of box girder web in mid-span section is the worst location for bearing load. Moreover, the change of the longitudinal tensile stress at the junction of short flange and bottom of pressure bearing box girder is generally larger than the long flange, for which the eccentric load effect should be paid attention to during the construction process. The change of the maximum transverse tension stress of the pressure bearing box girder appears when box girder is traversed to the designed position, where near the middle outrigger of bridge machine. At this time, the middle outrigger of bridge machine is bearing the largest load. Overall, during the construction process, the concrete stress of pressure bearing box girder has not exceeded the limited values. The results showed that new transportation and erection construction technology is safe, reliable and efficient, which is worth referencing and popularizing for similar projects.

Key words: asymmetric; large tonnage; precast box girder; erection test; finite element calculation

(责任编辑 韩 超)