

钢箱梁顶推施工过程仿真与监测分析

王祥宇¹, 刘月², 李璇², 高猛镭¹, 王伟¹

(1. 中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 050001; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 基于广东省江门市一座在建跨江桥梁, 利用监测技术, 通过对顶推施工全过程各关键测点进行变形及应力监测, 掌握钢箱梁、导梁的变形及应力变化情况, 并结合 MIDAS Civil 有限元分析软件进行施工模拟, 将实测值与模拟值进行对比, 为钢箱梁顶推施工提供技术保障。结果表明: 顶推过程中导梁与钢箱梁的竖向位移及应力的实测值与模拟值基本相符, 变化处于合理范围内, 确保了钢箱梁顶推施工时成桥线性及内力状态符合要求。

关键词: 钢箱梁; 变形监测; 应力监测; 有限元模拟

中图分类号: TU745.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0204-06

0 引言

在箱梁顶推过程中, 结构的内力和变形会随着顶推过程不断变化, 且钢箱梁板件相较于混凝土梁更薄, 因此在顶推过程中需要特别关注板件的局部屈曲问题。为确保成桥状态符合设计要求, 需要对施工过程中的控制数据进行监控^[1], 并通过识别和修正参数, 及时掌握结构的真实状态, 可以消除或减少偏差量的累积, 保证施工过程中的结构安全^[2-3], 最终确保成桥后主体结构的线形达到设计理想要求, 并使结构的内力分布与设计理想的内力状态相一致。

钢箱梁施工阶段的应力及变形监测是钢箱梁施工控制中的关键问题。易翔^[4]等使用 MIDAS 软件模拟某桥钢箱梁顶推全过程, 将箱梁实际顶推时的变形、应力与模拟值对比分析, 发现两者吻合程度较高; 杨晓东^[5]等通过对某 132 m 钢箱梁步履式顶推施工过程进行线形监控测量等监测监控后进行落梁和微调, 确保该顶推施工技术达到预期效果; 黄竞锋^[6]以南益高速公路南洞庭大桥的施工监控为背景, 分别从钢箱梁斜拉桥温度场、主梁施工控制以及斜拉索索力测试三个方面开展了研究工作, 对钢箱梁斜拉桥的施工过程和索力测试给予指导。

本文依托实际工程案例, 通过监测技术与仿真

分析等手段对顶推施工过程钢箱梁的变形和应变进行监测, 以便于确定施工控制的具体目标。其研究结果对该钢箱梁桥在实际施工过程中具有指导作用, 并对其他类型的桥梁提供借鉴意义。

1 工程概况

船厂跨江桥梁项目, 是广东省江门市重点建设项目, 路线全长约 0.78 km。主桥总长 174 m, 为(52+76+46)m 斜拉桥和异形拱桥协作体系钢箱梁桥, 其主跨部分总宽 26.5 m, 其余部分总宽 15.5 m。本工程钢箱梁跨越江门河, 采用步履式千斤顶分节段顶推就位。主桥总体布置见图 1。

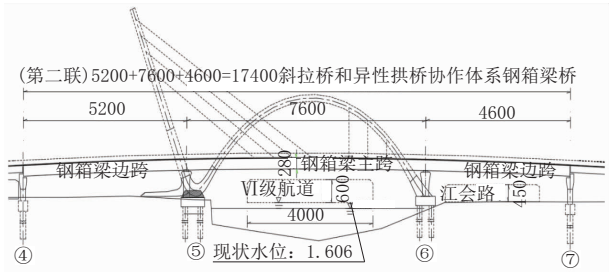


图 1 主桥总体布置图(单位: cm)

主桥主梁采用单箱四室钢箱梁断面, 主跨设置有人行道的钢箱梁总宽 26.5 m, 其中顶宽 26.5 m、底宽 15.5 m, 每侧悬臂长度为 5.5 m, 箱梁采用等高 2.8 m、箱梁顶为 2%横坡, 沿钢箱梁纵向每 3.0 m 设置一道横隔板和横肋板。主桥边跨不设置人行道段取消箱梁两侧悬臂, 钢箱梁顶底宽度均为 15.5 m, 见图 2。

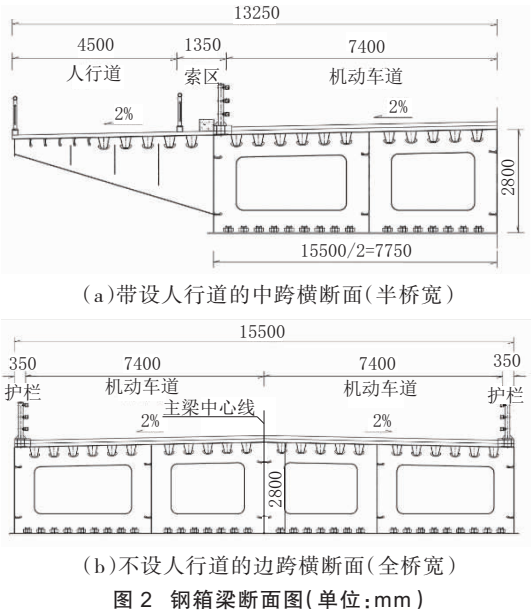
钢箱梁顶板钢板厚度在跨中为 16 mm, 而在支点附近加厚至 25 mm; 底板钢板厚度在跨中为 16 mm, 在支点附近加厚至 28 mm; 腹板钢板厚度在跨中为

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 中建路桥集团科技计划项目(G03D20201120)

作者简介: 王祥宇(1989—), 男, 学士, 工程师, 从事工程技术岗工作。

通信作者: 刘月(1997—), 女, 硕士, 从事土木工程方向研究工作。电子信箱: 1785935155@qq.com



16 mm, 支点附近加厚至 20 mm。此外,箱室内顶底板每间隔 0.6 m 左右设置一道 U 形加劲肋,底板每间隔 0.415 m 左右设置一道 T 型加劲肋;横隔板钢板厚度为 16 mm,均设置人孔。设置有人行道的悬臂板,其腹板厚度为 16 mm,翼板厚度为 16 mm。

为降低顶推时钢箱梁前端悬臂负弯矩,在箱梁前端安装一长 30.5 m 的导梁配合箱梁顶推施工。钢导梁采用焊接工字钢形式,梁高 2.75 m,腹板厚 20 mm;顶底板宽度均为 500 mm,板厚 20 mm;沿钢导梁纵向每隔 1.5 m 设置有板厚为 12 mm 的竖向加劲板;在距离顶板 375 mm 及底板 1 274 mm 处设置有宽度 200 mm、厚 12 mm 的水平加劲;为保证施工时支承符合要求,在底板处每隔 300 mm 布置 16 mm 厚的局部竖向加劲板。

2 钢箱梁施工

主梁钢箱梁采用顶推法和吊装法施工,在江门河南侧空地上搭设主桥钢箱梁顶推的施工平台,在平台上安装主梁和导梁,河道中架设临时支墩,并在支墩上安装垫块和顶推设备。顶推施工主梁的中跨和北边跨,顶推过程中安装接长钢箱梁南边跨,待施工到位后拆除垫块及导梁并落梁,完成整个主梁的施工。钢箱梁顶推时临时支墩和顶推支架布置见图 3。主梁顺桥向共划分 17 个节段,分为六轮次拼装及五轮次顶推。顶推施工工况(见表 1)。

3 仿真模拟

采用有限元软件 MIDAS Civil 模拟钢箱梁顶推全过程。钢箱梁的顶板、底板和腹板采用板单元模

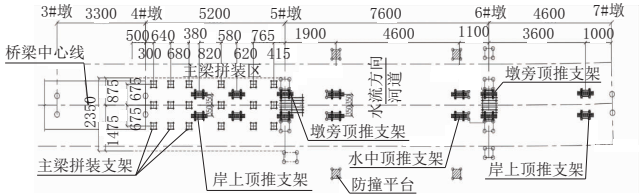


图 3 支架布置总平面图(单位:cm)

表 1 顶推施工工况

工况	施工节段	顶推距离 /m
1	Z1-Z3	15.61
2	Z4-Z6	14.99
3	Z7	13.50
4	Z8	39.30
5	Z9-Z12	47.16
6	Z13-Z17	/

拟;钢箱梁的 U 肋、板肋、T 肋及导梁采用梁单元模拟。有限元模型中,护栏、工地连接结构等作为分布质量加载到各节点、单元上;导梁等杆件内部的筋板只考虑其质量;板件之间的焊缝及螺栓连接,以及导梁与钢箱梁之间均采用共节点方式模拟。在顶推的不同阶段,在相应墩顶的顶推支点设置横向约束(X 向)和竖向约束(Y 向),尾部顶推支点设置顺桥向约束(Z 向)。有限元模型见图 4。

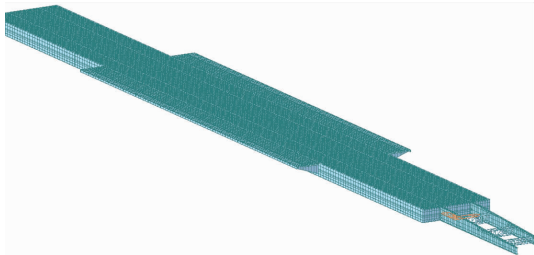


图 4 有限元模型

钢箱梁及导梁模型的计算荷载包括钢箱梁及导梁的自重,软件自动计算。

4 施工过程中测点布置

4.1 变形监测

为了控制成桥线形达到设计要求,需要对施工时梁体的变形情况进行监测。通过在每个顶推工况的施工断面处布置测点,观察各点顶进过程中水平位移的变化情况,及时修正不合理参数,以保证箱梁线形和桥面线形满足要求。

(1)钢箱梁变形监测

根据施工方案可知,主梁共分为六轮次拼装及五轮次顶推,每完成一轮次拼装并顶推至一定位置

后再进行下一轮次的拼装与顶推。主梁共划分为 17 个节段,在每节段前端布置 1 个变形监测断面,钢箱梁变形监测断面布置见图 5。由于第一、三跨与第二跨截面构造形式不同,所以设置的截面测点位置和数量也不同。钢箱梁边跨部分每个监测断面布置 3

个测点,分别位于箱梁中心线及左右两侧,共计 33 个测点;主跨部分每个监测断面布置 5 个测点,分别位于箱梁中心线及左右两侧各两个,共计 35 个测点,具体布点位置见图 6(黑色长方块)。钢箱梁变形监测采用精密水准仪和全站仪完成。

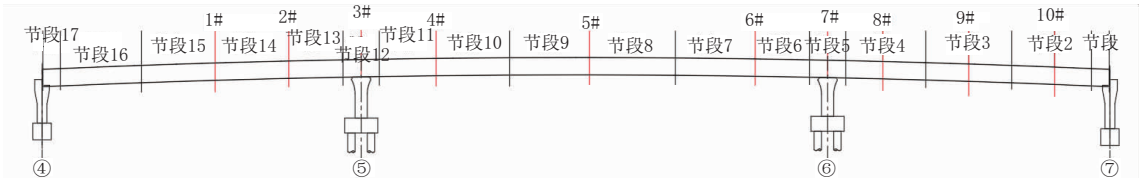


图 5 钢箱梁变形(应力)监测截面布置

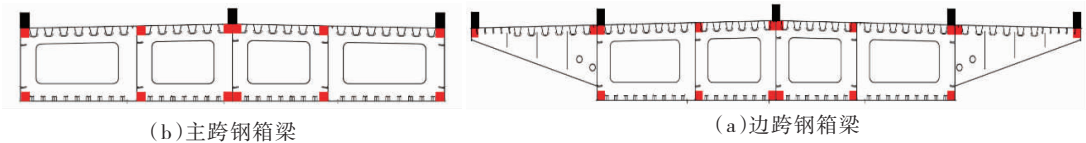


图 6 钢箱梁变形监测测点布置

(2)钢导梁变形监测
钢导梁梁端和跨中处各设置一个测量断面,每个断面布置 2 个测点,共 6 个测点见图 7。钢导梁变形监测同样采用精密水准仪和全站仪完成。

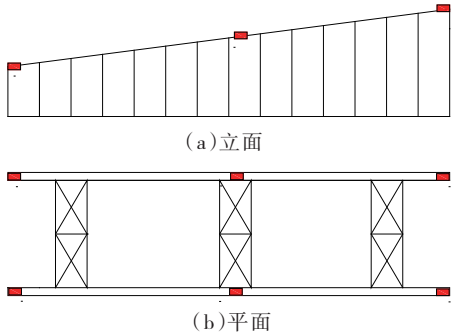


图 7 钢导梁测点布置

4.2 应力监测

采用顶推法施工时,由于梁的位置不断变化,每个截面的内力也会随之改变。通过对箱梁关键断面的应力进行监测,了解结构的受力状态,以便采取必要的措施来保证结构的安全。

(1)钢箱梁应力监测
主梁应变监测选取关键截面包括:主墩墩顶段(3#、7#)、主跨中段(5#)、边跨中段(9#)、1/4 截面处(4#、8#)及 3/4 截面处(6#、9#),监测截面位置见图 5。各截面应力监测测点布置见图 6(红色长方块)。其中,主梁主跨共有 5 个监测截面,共计 80 个测点;边跨共有 5 个监测截面,60 个测点。应变传感器采用表贴式振弦式应变计。

(2)钢导梁应力监测
在导梁后端、1/4 断面处、跨中及 3/4 断面处各布置 4 个应力测点,共 16 个测点,监测位置见图 8。采

用表贴式振弦式应变计进行监测。

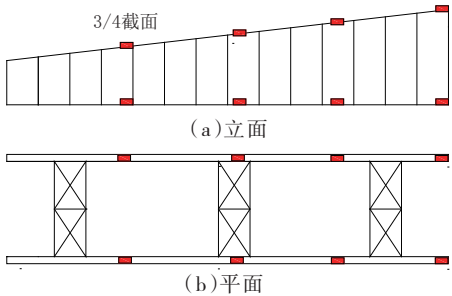


图 8 钢导梁应力测点布置

5 模拟值与监测值对比分析

考虑监测测点数量较多,故仅选取有代表性截面上的测点。由于钢箱梁在顶推过程中节段的不断增加,仅有节段 1 端头两测点监测位置不发生改变,故钢箱梁选择节段 1 端头左右两个测点的位移(其中沿顶推前进方向左侧为左测点,右侧则为右测点)。同样,钢导梁选择梁端处两个位移测点。钢箱梁及导梁的位移测点选取见图 9。

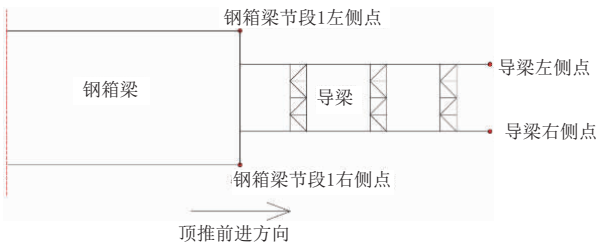


图 9 钢箱梁与导梁位移测点示意图

钢箱梁应力取上顶板各截面中间两测点应力的平均值,具体截面位置见图 7、图 8。导梁应力分别取导梁后端及 3/4 截面处上部及下部各截面测点应力的平均值(如导梁后端上部应力取左右 2 个测点的

平均值),具体截面位置见图7。

5.1 变形结果对比分析

顶推过程中,导梁与钢箱梁左右测点位移的理论值与实测值对比情况见图10、图11。钢箱梁上挠及下挠最大时的变形见图12。其中实测值剔除了测点未测数据。

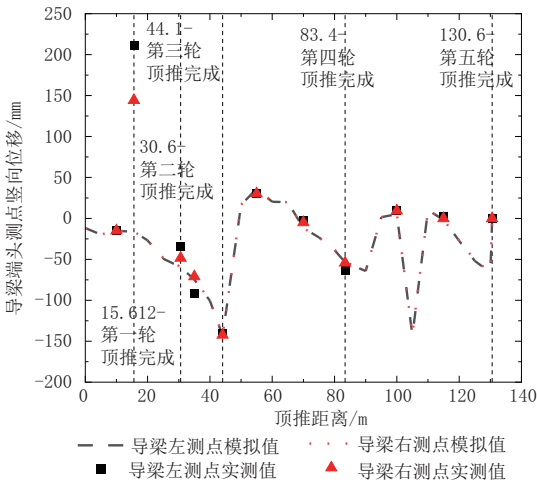


图10 导梁端头左右测点位移变化

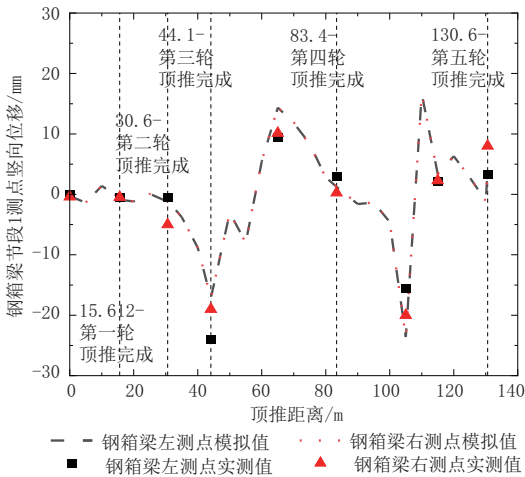


图11 钢箱梁节段1左右测点位移变化

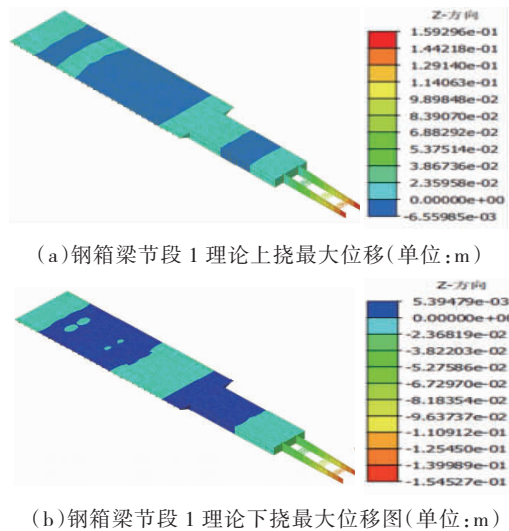


图12 钢箱梁节段1左右测点理论位移

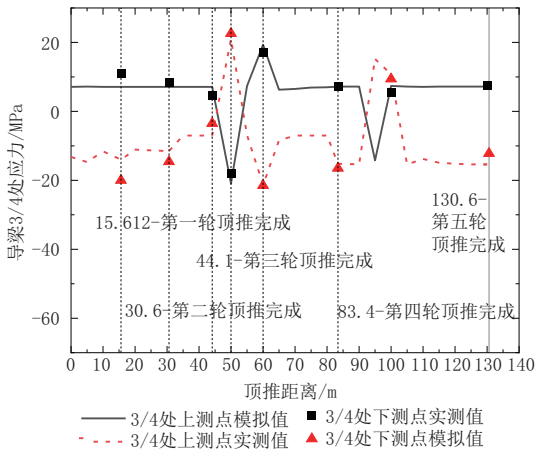
由图10可知,导梁实测数据中除了第一轮顶推完成时的位移明显过大情况,其他数据与理论值无较大误差,其原因在于测点处理时遭到破坏。导梁左测点实测上挠及下挠最大分别为20.12、-140.27 mm,理论上挠及下挠最大分别为36.28、-143.35 mm,均对应顶推距离为55、44.1 m。导梁右测点实测值及理论值与左测点相差不大

由图11可知,钢箱梁左测点实测上挠及下挠最大分别为16.60、-25.52 mm,理论上挠及下挠最大分别为14.37、-23.61 mm,均对应顶推距离为65 m、105 m。钢箱梁右测点实测值及理论值与左测点较接近。

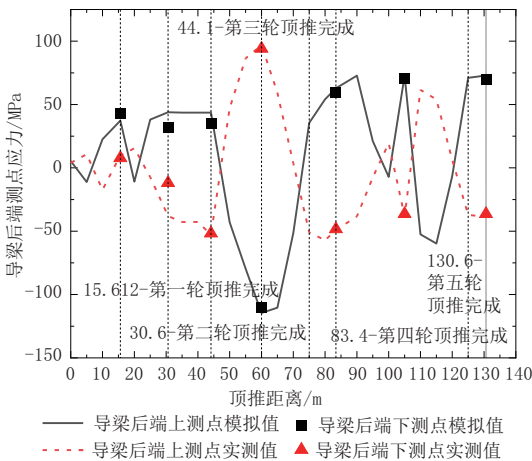
由模拟值与实测值的变化情况可知,导梁实测变形大部分与理论变形相近,其中导梁变形在第一轮顶推过程中偏差较大,随着不断纠偏,偏差得到控制;钢箱梁实测变形与理论变形相近。

5.2 应力结果对比分析

导梁在顶推过程中测点的实测应力与模拟应力对比见图13。



(a)导梁3/4处应力



(b)导梁后端处应力

图13 导梁实测与模拟应力对比

由图 13 可知,导梁 3/4 处上测点最大拉应力实测值 17.21 MPa,模拟值 19.3 MPa,均对应顶推距离为 60 m;最大压应力实测值 -17.89 MPa,模拟值 -20.9 MPa,均对应顶推距离为 50 m。下测点最大拉应力实测值 22.6 MPa,理论值 21.00 MPa,均对应顶推距离为 50 m;最大压应力实测值 -21.5 MPa,理论值 -21.3 MPa,均对应顶推距离为 60 m。

导梁后端上测点最大拉应力实测值 70.23 MPa,理论值 72.9 MPa,均对应顶推距离 105 m;最大压应力实测值 -110.23 MP,理论值 -114.5 MPa,均对应顶推距离为 60 m。导梁后端下部测点最大拉应力

实测值 94.12 MPa,理论值 96.9 MPa,均对应顶推距离 60 m;最大压应力实测值 -51.70 MPa,理论值 -52.7 MPa,均对应顶推距离 44.1 m。由以上各关键断面得出的应力结果可知,顶推过程中导梁各测点的实测应力与模拟应力相近。

钢箱梁在顶推过程中各监测截面中间测点的实测应力平均值与模拟应力平均值对比见图 14,其中最大平均拉应力与最小平均压应力及相应顶推位置见表 2。由于应力图较多,仅截取 8# 截面最大应力云图,见图 15。

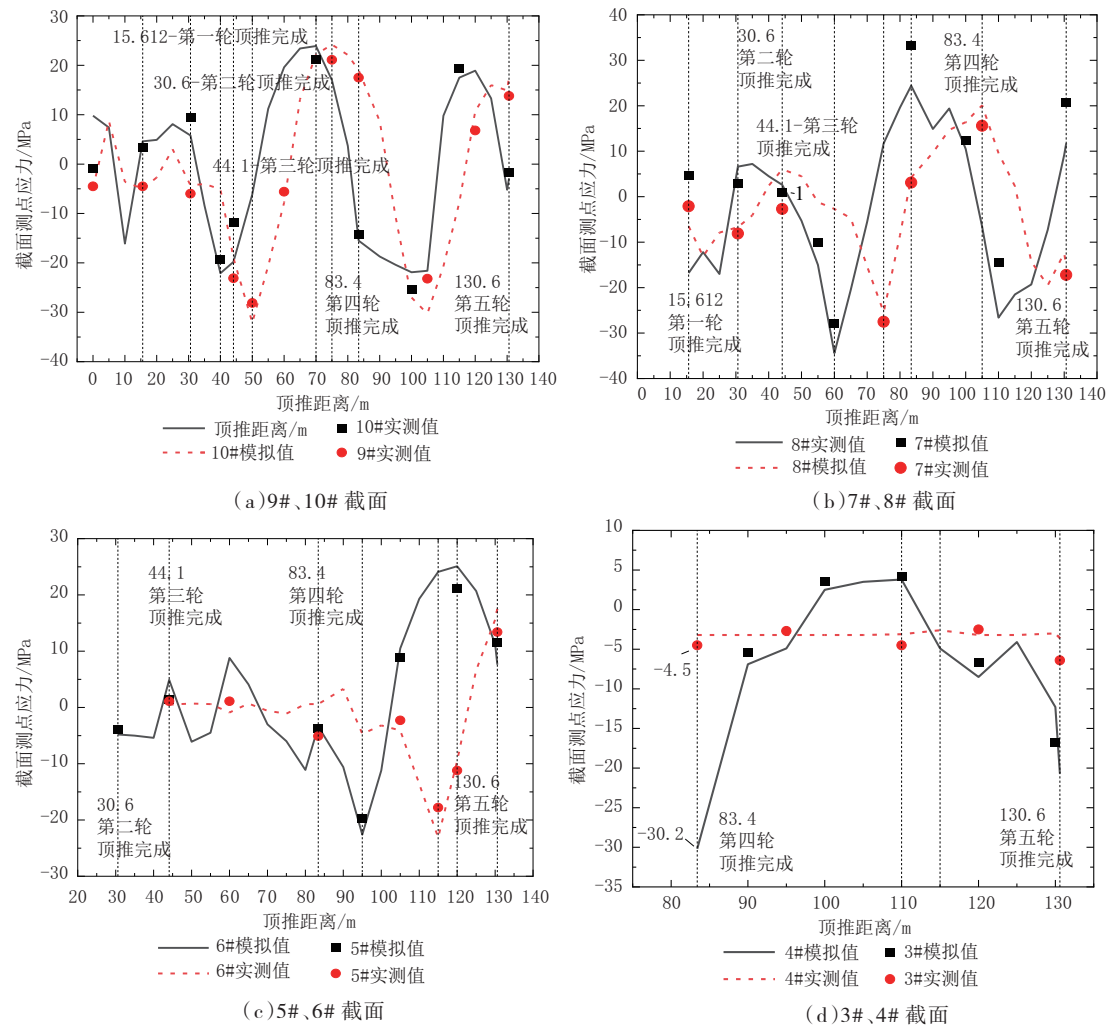


图 14 钢箱梁实测与模拟应力对比

由图 14 和表 2 可知,钢箱梁各截面的实测应力与模拟应力基本相符,结构应力变化处于合理范围内。

6 结 论

通过对钢箱梁顶推施工过程进行仿真与监测分析,得出以下结论:

(1)借助软件 MIDAS 模拟施工时结构的受力情况,并与实际监测值进行对比,保证了施工的顺利进

行,最终实现桥梁的施工线形与理论成桥的线形基本一致。

(2)顶推过程中,钢导梁、钢箱梁的变形与应力的实测值及模拟值出现偏差较大时,要注意及时进行纠偏处理。如在第二轮顶推完成时,钢导梁左右测点变形的实测值与理论值相差较大,这时需要检查各项推临时支架的变形情况,必要时可考虑进行局部加固。

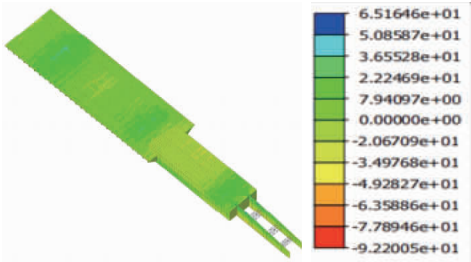
表 2 钢箱梁应力实测值与模拟值对比

截面	类别	实测值 /MPa	模拟值 /MPa	顶推距离 /m
10#	$\sigma_{\max}$	21.1	23.9	70.0
	$\sigma_{\min}$	-25.3	-22.9	100
9#	$\sigma_{\max}$	21.1	24.2	75.0
	$\sigma_{\min}$	-28.1	-32.1	50.0
8#	$\sigma_{\max}$	33.2	24.2	83.4
	$\sigma_{\min}$	-27.8	-34.4	60.0
7#	$\sigma_{\max}$	15.6	20.1	105.0
	$\sigma_{\min}$	-27.5	-25.4	75.0
6#	$\sigma_{\max}$	21.1	25.1	120.0
	$\sigma_{\min}$	-19.8	-22.6	95.0
5#	$\sigma_{\max}$	13.4	17.5	130.6
	$\sigma_{\min}$	-17.8	-23.1	115.0
4#	$\sigma_{\max}$	4.2	3.8	110
	$\sigma_{\min}$	-16.7	-20.7	130
3#	$\sigma_{\max}$	—	—	—
	$\sigma_{\min}$	-6.4	-3.6	130.6

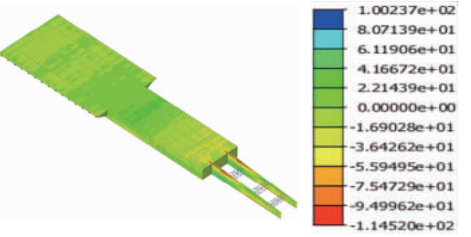
(3)顶推过程中,钢箱梁变形及应力、钢导梁应力的实测数据与模拟数据基本符合,说明两种方法进行对比分析可有效反应结构的受力状态,为保障施工的顺利进行提供了理论依据。

参考文献:

[1] 苏成,廖威,袁昆,等.桥梁健康监测在线预警指标研究[J].桥梁建



(a)钢箱梁 8# 截面测点最大拉应力云图(单位:MPa)



(b)钢箱梁 8# 截面测点最大压应力云图(单位:MPa)

图 15 钢箱梁 8# 截面应力云图

设,2015,45(3):44-50.
[2] 彭卫兵,沈佳栋,唐翔,等.近期典型桥梁事故回顾、分析与启示[J].中国公路学报,2019(12):132-144.
[3] 解祎,黄海燕.基于 ANSYS 的桥梁施工健康监测研究[J].低温建筑技术,2013(12):59-61.
[4] 易翔,郑辉,柏观福.钢箱梁顶推施工控制与数值模拟[J].长沙大学学报,2021,35(5):18-22,33.
[5] 杨晓东,汪选吉,刘艳双,等.某 132 m 钢箱梁步履式顶推施工技术 & 监测研究[J].建筑结构,2023,53(增刊 1):2292-2295.
[6] 黄竞锋.大跨钢箱梁斜拉桥的施工监控及索力测试[D].长沙:湖南大学,2020.

(上接第 161 页)

时,在小流域后期运管阶段,该模型也可随着流域建设发展而作相应调整,辅助小流域实现长效治理与动态管理相结合的目标,构建稳定、科学生态圈。

参考文献:

[1] 付国强.浅谈小流域治理技术方案[J].环境工程,2023,41(增刊 2):146-149.
[2] 连燕.基于加权和多目标优化法在小流域治理中的研究[J].云南水力发电,2022,38(8):66-70.
[3] 王春明,王文冬,高晓薇,等.某生态清洁小流域治理与综合效益分析[J].水利技术监督,2022(9):220-223,264.
[4] 段义字,王可壮,何倩,等.基于新发展理念的浚谷小流域治理实践与探索[J].水利规划与设计,2022(9):10-13.
[5] 刘永杰.小流域治理中水土保持技术应用的研究[J].农业技术与装备,2021(5):103-104.

[6] 曲静.小流域治理工程的建设管理[J].河南水利与南水北调,2021,50(9):75-76.
[7] 张柯.基于生态文明建设的小流域治理与城乡融合发展浅见[J].中国水土保持,2020(12):20-22.
[8] 陈雪英,梁敏.层次分析法在河北省小流域治理土地资源评价中的应用研究[J].河北水利,2020(9):18-20.
[9] 侯小华.浅谈小流域治理规划与社会进步[J].农业科技与信息,2020(17):55-56,62.
[10] 庞南柱,李远游.探索水土保持技术在小流域治理中的应用实践[J].科技与创新,2020(13):160-161.
[11] 施建林.浅谈皖南山区小流域治理[J].安徽农学通报,2020,26(12):53-54.
[12] 褚雅红.小流域治理中水土保持措施及效益分析[J].内蒙古水利,2020(2):56-57.