

多跨长联公轨合建钢桁梁桥顶推施工控制技术研究

李良军

(杭州市交通运输发展保障中心, 浙江 杭州 310030)

摘 要: 杭甬高速钱塘江大桥结构形式采用悬链形上加劲连续钢桁梁桥, 跨径组合为 73.4 m+122 m+4×240 m+122 m+73.4 m, 全长 1350.8 m。上部结构主桁分别采用步履式顶推和拖拉式顶推方法从两侧向中跨施工, 最后跨中直接合龙。为使该桥建成后线形及应力均达到设计目标, 基于钱塘江大桥钢桁梁的工程特点和施工方法, 结合有限元计算结果, 确定了本桥的施工控制工作内容。施工控制结果表明: 整个顶推施工过程中, 本桥主桁线形、结构的应力状态均控制在规范限值以内, 与理论值偏差较小, 达到了施工监控目标。

关键词: 大跨长联; 公轨合建; 钢桁梁桥; 步履式顶推; 拖拉式顶推; 施工控制

中图分类号: U445.46

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0113-05

0 引言

受施工条件限制或者出于避免或降低施工对航道通行的影响, 钢桁梁桥施工采用拖拉式顶推、步履式顶推、转体施工、架桥机架设等施工方法^[1]。其中, 拖拉式顶推施工主要的施工流程为待架钢桁梁在平台上进行预拼装, 同时在钢梁下设置上滑道, 在墩台顶面铺设下滑道, 利用拖拉牵引装备将预拼钢桁梁沿桥梁轴线纵向拖拉至设计桥位。而步履式顶推法则通过液压泵站对施工中易控制与调整结构偏位的顶推设备驱动来实现顶推^[2]。

钢桁梁顶推施工过程中存在许多影响桥梁线形与应力的因素, 如钢结构制造误差、结构定位误差、环境参数误差等, 对这些影响因素进行分析和控制, 不仅能保证工程安全与质量, 也能对改进顶推法的效果进行有效评估和预测。

本文以沪杭甬高速钱塘江大桥为工程背景, 结合步履式顶推和拖拉式顶推的施工特点, 介绍了本项目的施工控制重难点、具体实施内容及施工控制成果, 可为其他类似结构的施工控制提供参考。

1 工程概况

沪杭甬高速钱塘江大桥为跨径组合为 73.4 m+122 m+4×240 m+122 m+73.4 m 的四主跨悬链形上加劲连续钢桁梁桥, 桥梁建成后的效果见图 1。



图1 沪杭甬高速钱塘江大桥效果图

主桁标准桁片为两个节间长度, 分为 20 m 节段和 24 m 节段, 高度 14.5 m, 宽度 2.75 m, 最大吊重 114 t。主桁上、下弦杆均采用箱形截面。桁架腹杆分为竖杆和斜杆, 竖杆采用 H 形截面, 斜杆采用 H 形和箱形截面, 见图 2。

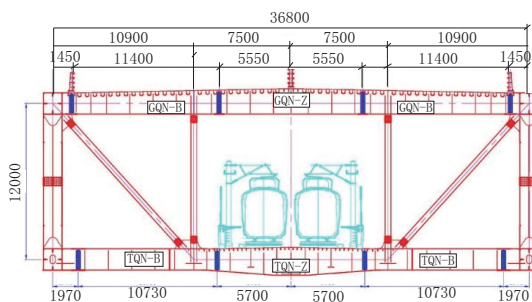


图2 主桥钢桁梁标准横断面布置图(单位:mm)

下层轨道桥面系采用正交异性钢桥面板结构。正交异性钢桥面板由纵梁、节点横梁、节间横肋及带纵向加劲肋的钢桥面板组成。在上层公路节点横梁与下层轨道节点横梁之间布置有横向联结系, 以减小横梁跨度, 使上下横梁共同受力。

本桥共设置 5 个桥门架立柱, 桥门架立柱采用变截面箱体, 内宽和弦杆一致, 下部与主桁架上弦连接, 上部与上加劲弦连接。上加劲弦采用变高度箱形截面, 通过吊杆与主桁上弦连接, 吊杆与主桁、上加劲弦

收稿日期: 2021-12-08

作者简介: 李良军(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程项目管理工作。

的连接方式为铰接或栓接。

2 顶推施工方法及施工控制特点

2.1 顶推施工方法

钱塘江大桥为主跨 240 m 的多跨长联公轨两用悬链形上加劲钢桁梁桥,跨数多,跨径大,在国内少有先例,且桥位处运输条件差,超高、超宽、超重钢桁梁节间难以整体运输进场,因此只能采用零散、小构件运输到现场进行散拼顶推施工工艺。根据施工图设计和施工方案,钱塘江大桥总体施工步骤为先安装钢桁梁,顶推到位后再安装刚性加劲弦。钢梁顶推采取两岸双向顶推施工,在 ZQ4~ZQ5 跨内进行合龙。为减少钢梁顶推跨度,在 ZQ2~ZQ5# 墩之间依次设置临时墩 LD1~LD5,共计 10 个临时墩。纵桥向,临时墩 LD1 距离 ZQ3# 墩 70 m,其余临时墩跨度均为 80 m,见图 3。

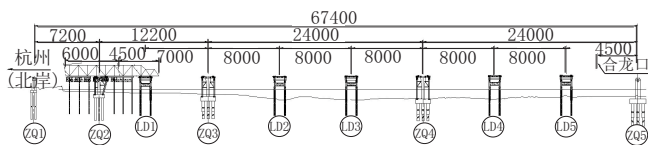


图3 临时墩布置图(以北岸侧为例,单位:cm)

其中,北岸主桁采用步履式顶推法进行施工(见图4),即在主墩墩旁托架和临时墩墩顶安装滑道梁,并在滑道梁顶设置滑块等滑移设备;滑道梁两端安装步履机,在步履机顶设置垫梁,通过步履机三向千斤顶对钢梁进行顶推和顶推过程中的纠偏。南岸主桁则采用多点拖拉式顶推施工。每个临时墩及墩旁托架设置滑道梁,每处滑道梁设一套顶推设备,包括竖向千斤顶、水平拖拉连续千斤顶、水平横向纠偏装置及滑靴。在钢梁顶推初期,由于钢梁拼装长度短,钢梁刚度大,重量轻,顶推摩阻力相对较小,采用单动一侧连续千斤顶的方式进行纠偏;在钢梁顶推及倒换滑块过程中,采用在滑道梁顶面两侧焊接槽钢作为导向限位装置的对滑块进行约束;最终钢桁梁顶推到墩顶设计位置后,则采用横移滑座进行纠偏。

南、北岸主桁顶推施工合龙后,刚性加劲弦通过公路桥面运输,在公路桥面上安装,最后逐跨合龙。上部刚性加劲弦安装完成后,钢梁整体顶升,安装永久支座,最后落梁。

2.2 顶推过程施工控制策略

(1) 线形控制策略

由于本桥主梁钢桁架梁采用顶推施工,钢桁梁各构件采用栓接形式,在整个施工过程中结构的线



(a) 支架组拼钢桁梁

(b) 刚性加劲弦安装

图4 顶推施工过程

形和内力状态可调整的空间很小;由于调节空间也非常有限。可见,本桥总体控制更接近于开环控制,在控制策略上对前期计算的精度控制要求高。

当然,无论是步履式还是拖拉式顶推,其施工作业均是一个动态过程,需实时了解并调节已组拼钢桁梁顶推过程中的状态,以确保钢桁梁的整个顶推过程及成桥阶段线形能满足施工控制要求。主桁顶推施工中,线形控制难点主要是待拼装梁段的定位高程确定、已拼梁段轴线的控制与纠偏。在钢桁梁拼装时,受温度变化加工制造误差、现场临时荷载等各种因素影响,均可能出现钢桁梁平面线形、竖向线形及双桁高程偏差的系统性问题。在钢桁梁安装及顶推过程中,应采用主动测量及时纠偏技术,即针对每一节间架设或各次顶推完成后的测量数据进行分析,根据已拼装梁段在各支撑位置的线形与制造线形的偏差情况,计算调整待拼梁段的拼装线形,并确定下一施工循环开始前的纠偏微调方案。

(2) 安全控制策略

桥梁结构的稳定、施工过程安全可靠,是确保施工达到设计要求的前提和保障。在主梁顶推过程中,主桁结构受力复杂,正负弯矩交替变换,因而需要对其结构的总体安全性和稳定性加强控制以及临时支撑系统的安全控制。

因此,在顶推施工开始前,应对关键杆件的应力分布进行计算分析。在顶推施工过程中,对关键杆件的应力进行实时监测,并将监测数据与理论计算结果进行对比分析,确保结构受力状态准确,安全可靠。

此外,每次顶推循环过程中,钢梁整体起顶和落梁后的纵坡线形,决定各临时支撑点反力的大小,从而影响钢梁的内力状态,如果控制不当,会造成个别支点反力过大,从而使钢梁底板发生局部失稳破坏,因此,在顶推过程和落架阶段的支撑反力和结构内力都需要重点关注,必要时应进行适当调整。

(3) 无合龙段的控制策略

本桥顶推划分为两个工区,分别从两侧向中间顶推,在靠近 ZQ5 墩位置 45 m 处直接合龙,不额外设置合龙段。由于合龙前两个悬臂端口的悬臂长度不同,造成施工位移存在差异,加上钢桁梁合龙杆件多,给合龙带来一定困难。目前计划采用顶落梁的方式实现合龙,但需考虑到桥面宽度大,若横向存在扭转,纠偏措施难度较大,给合龙带来较为严峻的考验。

(4)多跨长联对支座预偏的控制

主梁安装过程受到桥梁恒载作用、施工荷载以及支座安装时的温度影响,会导致主梁的梁长发生变化,进而引发支座偏移。因此在支座安装时必须根据理论计算结果对支座安装进行预偏控制。

(5)加劲弦及刚性吊的控制策略

本桥对加劲弦及刚性吊杆的线形控制总体要求不高,关键是如何保证安装时的顺利连接。由于采用栓接形式,对加劲弦及刚性吊杆的制造精度提出了较高的要求,同时考虑到钢桁梁顶推到位时在临时墩上的变形特点和误差水平,需重点做好吊杆预留调节的可能,并结合现场顶落梁方案,实现加劲弦及刚性吊杆的顺利安装。

3 施工监控关键问题分析

通过前期分析,本桥监控中的关键问题包括:如何实现无合龙段情况下的合龙口顺利拼接、日照温差对钢桁梁合龙线形的影响分析、误差调整措施的敏感性分析以及顶推过程中临时墩抄垫高度偏差对结构的影响分析等。

3.1 监控计算说明

采用 Midas Civil 建立全桥监控计算分析模型,施工过程进行正装分析,得到施工过程中各个控制参数,包括结构应力、反力、位移、荷载参数等,并为后续主桁拼装和顶推控制提供指导。

主弦杆、腹杆、横联、钢塔及刚接吊杆采用梁单元模拟,铰接吊杆采用桁架单元模拟,钢顶板采用板单元模拟。全桥共划分为 13 719 个节点、34 638 个单元。有限元模型见图 5。



图 5 钱塘江大桥全桥有限元模型

3.2 主桁合龙前各临时墩回落量计算

针对两侧向中央顶推的施工总体方案,通过理论计算确定了两个工区合龙口相应调平方案(通过

部分临时墩回落措施),以保证合龙口的顺利拼接。

钢桁顶推就位后合龙口两侧累积竖向变形情况见图 6,一工区合龙口下挠量约为 24 mm,二工区合龙口下挠量为 36 mm,两侧高差为 12 mm。

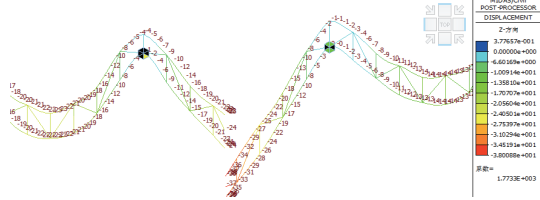


图 6 顶推就位后合龙口两侧竖向累积变形(单位:mm)

通过计算,通过对部分临时墩进行相应回落操作,完成合龙口的调平,具体回落调整方案见表 1。

表 1 合龙前各临时墩回落量 单位:mm

工区	一工区		二工区	
临时墩编号	ZQ4	LD4	临时墩 1	临时墩 2
回落量	-25	-50	-60	-30

在支座完成回落后,合龙口高差情况见图 7,一工区合龙口上挠 19 mm,二工区合龙口上挠 31 mm,两侧合龙口高差约在 1 mm 以内,理论上满足合龙拼接需要,该临时墩回落方案可行。

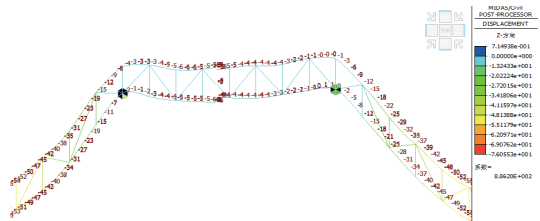


图 7 临时墩回落后合龙口两侧竖向累积变形(单位:mm)

3.3 日照温差对钢桁梁合龙线形的影响分析

考虑到本桥钢桁梁未设置合龙段,主桁合龙过程对主桁合龙口线形控制精度要求较高,且横桥向两片主桁间距较大,日照对两片主桁产生的温差可能带来主桁合龙困难。因此,本节对桁间温差对合龙口的竖向及纵桥向线形影响进行相应的敏感性分析,按 5℃和 10℃的桁间温差分别对一工区合龙口及二工区合龙口线形影响进行定量分析。

计算结果表明,日照温差对于合龙口高差的影响较小,而对于合龙口宽度的影响较为敏感,10℃的桁间温差可导致温度较高一侧桁片合龙口长度缩短 40 mm,温度较低一侧合龙口长度扩大约 18 mm,两片主桁合龙口宽度差达到近 60 mm。

因此,在顶推就位后及时在 LD4# 墩位置(一工区)和二工区临时墩 1# 处设置纵向约束,同时在温度较为恒定的时段(深夜至日出前时段)尽快主桁片

合龙锁定以保证主桁的顺利合龙。

3.4 临时墩抄垫高度偏差对结构的影响分析

在顶推过程中,需要对各临时支撑点进行相应抄垫要保证结构受力状态与理论受力状态保持一致,针对实际顶推施工中可能发生的抄垫高度偏差,本节进行相应抄垫量偏差影响试算,以了解结构对抄垫量偏差的敏感性。

分别按照理论抄垫量和次边支点(2# 支点)抄垫量 -1 cm 和 +1 cm 三种情况下各临时墩反力分布情况见图 8(临时墩编号由左至右分别为 1#~6#)。

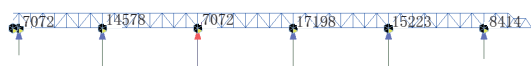


图 8 理论抄垫高度下各临时墩反力分布情况(单位:kN)

计算表明,抄垫高度的偏差对支反力影响较大,最大影响量近 10%。抄垫误差对结构应力影响量相对较小。因此,应重点关注临时墩反力的变化情况。

4 顶推施工控制工作内容及成果

4.1 钢桁梁线形控制

线形控制是钢桁梁桥施工控制的主要工作和重要环节。线形控制的质量直接关系到结构安全、杆件安装以及全桥建成通车后的行车舒适度。

钢桁梁线形测点布置每梁段前端,横向设置 3 个标高观测点(其中 A、C 测点位于主桁上弦杆上缘、B 测点位于对应断面横梁中心上缘),测点布置见图 9,在每一施工循环各主要工况作用前后,采用精密水准仪观测主桁各线形控制点的标高和位移(见图 10),并根据监测结果提出调整措施。

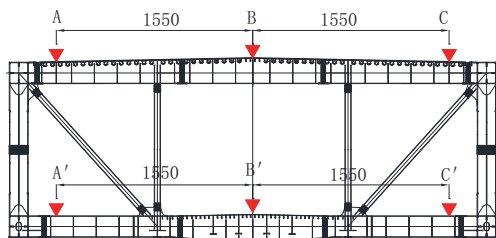


图 9 主桁线形测控点断面布置示意图(单位:cm)



图 10 主桁线形监测

以合龙过程为例,对本桥主桁施工过程线形控制控制进行说明。合龙前顶推完成后,大部分支点抄垫实测高程与理论高程接近,偏差在 2 cm 以内。但由于合龙口附近支点抄垫高程存在偏差,以及现场实际位移响应与理论值不同,左右侧主桁合龙端高程相对误差为 5.0 cm 和 4.6 cm,见表 2。

表 2 合龙前各支点抄垫及合龙口误差情况 单位:m

支点位置	节间号	顶面理论高程	左侧实测	差值	右侧实测	差值
临时墩 LD1	E11	22.861	22.853	-0.008	22.851	-0.010
主墩 ZQ3	E18	23.057	23.070	0.013	23.059	0.002
临时墩 LD2	E26	23.601	23.602	0.001	23.596	-0.005
临时墩 LD3	E34	23.816	23.803	-0.013	23.800	-0.016
主墩 ZQ4	E42	23.798	23.818	0.020	23.806	0.008
临时墩 LD4	E50	24.183	24.187	0.004	24.187	0.004
临时墩 LD5	E58	24.500	24.492	-0.008	24.483	-0.017
北侧合龙端	61~62		24.495	0.050	24.511	0.046
南侧合龙端			24.445		24.465	
主墩 ZQ5	66	24.379	24.360	-0.019	24.356	-0.023
临时墩 LD1	58	24.446	24.442	-0.004	24.448	0.002
临时墩 LD2	50	24.241	24.226	-0.015	24.231	-0.010
主墩 ZQ6	42	23.837	23.825	-0.012	23.831	-0.006
临时墩 LD3	34	23.906	23.897	-0.009	23.903	-0.003
临时墩 LD4	26	23.719	23.716	-0.003	23.711	-0.008
主墩 ZQ7	18	23.177	23.175	-0.002	23.166	-0.011

为保证合龙顺利进行,根据现场情况分析计算后,确定钢桁梁支点抄垫高程纠偏、调整量见表 3。

表 3 合龙前钢桁梁支点理论计算调整值

墩号	节点号	左幅支点抄垫		右幅支点抄垫	
		起顶高度/cm	反力变化/t	起顶高度/cm	反力变化/t
ZQ5	66	4.0	50.0	-62.0	3.5
-8.0	-27.0	LD1	58	2.0	1.8
LD2	50	1.2	66.0	-71.0	1.0
43.0	-41.0	ZQ6	42	—	—

纠偏调整后复测结果见表 4,左右侧主桁合龙端相对误差均控制在 1 cm 以内,满足合龙需求。表明高程调整措施效果良好,达到了预期目标。图 11 为顶推合龙后的钱塘江大桥。

表 4 支点高程抄垫纠偏调整后的合龙口误差情况

位置		左侧		右侧	
		实测	差值	实测	差值
下桥面	北侧	24.311	0.008	24.325	0.001
	南侧	24.303		24.324	
上桥面	北侧	1.715	0.000	1.705	0.009
	南侧	1.715		1.696	



图 11 顶推合龙后的钱塘江大桥

4.2 钢桁梁关键截面应力监测

钢桁梁桥从开始拼装至顶推合龙完成,期间经历多次体系转换,结构重量不断增加,临时荷载变化频繁,桁架杆件应力在整个施工过程中也处于持续的变化过程中^[4]。作为结构安全状态的重要指标,对钢桁梁杆件应力进行监测具有相当的重要性。

本桥钢桁梁顶推施工过程采用智能型温度表贴式钢结构应变计,配合振弦测试仪与自动化网络综合测量系统数据采集箱进行应力测试(见图 12),可及时发现结构在施工过程中产生非正常的变形和应力,对桥梁进行实时跟踪监测。顶推施工过程中,主桁受力较不利处应力监测断面布置见图 13。



图 12 自动化网络综合测量系统

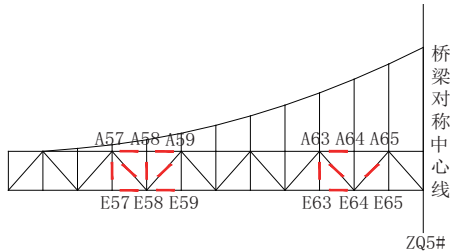


图 13 顶推施工过程中主桁受力较不利处应力监测断面布置图

以 A63E64 斜腹杆为例,主要顶推工况下杆件应力监测结果见表 5。

由表 5 可知,各主要顶推工况下,A63E64 斜腹杆应力计算值与实测值的总体规律一致,偏差较小,杆件应力水平在合理范围内,表明计算模型与结构的实际状态较为接近,结构处于安全状态。

4.3 主墩变位监测

在钢桁梁安装及顶推施工过程中,桥墩在上部结构自重和施工荷载作用下将不可避免地产生沉降和纵桥向偏位,桥墩变位的大小及不均匀程度将直接影响主桁和桥面的线形^[5]。因此,在主桁开始顶推

表 5 斜腹杆应力理论值与实测值最大值对比 单位:MPa

监测工况	实测应力最大值	对应理论应力	偏差
第一轮顶推完成	3.4	2.8	0.6
第二轮顶推完成	7.7	6.4	1.3
第三轮顶推完成	-26.1	-23.9	-2.2
第四轮顶推完成	23.5	21.1	2.4
第六轮顶推完成	-28.8	-27.2	-1.6
第八轮顶推完成	-28.1	-27.2	-0.9
第一轮顶推完成	3.4	2.8	0.6
第二轮顶推完成	7.7	6.4	1.3

施工时,记录桥墩沉降及偏位观测点数据作为初值,每个月对桥墩变位观测点进行一次观测,且在顶推施工前后等关键工况对变位测点进行观测,见图 14。



图 14 主墩高程及偏位测量测点布置及棱镜

以 ZQ2# 主墩为例,主要顶推工况下桥墩变位监测结果见表 6。由表 6 可知,各主要顶推工况完成后,ZQ1# 墩最大纵偏为 6 mm;第八次顶推后,主墩累计沉降最大为 3 mm,且左右幅纵偏、沉降量基本一致,表明桥墩变位处于合理范围内,对桥面线形影响较小。

表 6 ZQ2# 墩主墩变位监测数据 单位:m

监测工况	下游		上游	
	纵偏	沉降	纵偏	沉降
第一次顶推后	-0.002	-0.002	-0.001	-0.003
第二次顶推后	0.002	0.002	0.001	-0.002
第三次顶推后	0.003	-0.001	0.003	0.003
第四次顶推后	0.001	0.001	0.000	0.004
第五次顶推后	0.003	0.002	0.003	0.002
第六次顶推后	0.001	0.002	0.006	0.001
第七次顶推后	0.002	0.003	0.004	0.003
第八次顶推后	0.001	0.003	0.005	0.002

5 结 语

本文以沪杭甬高速钱塘江大桥为工程背景,简要介绍了本项目所采用的改进步履式顶推施工法和拖拉式多点顶推法及其施工控制的重难点,以施工图设计和施工方案为依据开展监控计算,制定了针

(下转第 131 页)

根据图 10 可知:工况 7 布置四支撑时,预制桥墩应力最小,达到 0.35 MPa;工况 1 布置两支撑时,预制桥墩应力最大,达到 1.31 MPa,尚未超过 C40 混凝土的轴心抗拉强度标准值 2.40 MPa。

根据图 11 可知:工况 7 布置四支撑时,预制桥墩变形最小,达到 0.11 mm;工况 1 布置两支撑时,预制桥墩变形最大,达到 0.62 mm,尚未超过预制桥墩平整度 5 mm 的要求。

当布置四支撑时,桥墩无明显变形且应力最小;当布置两支撑和三支撑时,对应力和变形影响不大,应根据现场实际情况来考虑支撑布置数量。

4 结 语

为确保预制桥墩在存储期间的安全,对预制桥墩的存储进行有限元分析。模拟了不同的支撑布置平面位置、桥墩叠放层数以及支撑布置数量,共 7 种工况。通过对比分析得出以下结论:

(1)预制桥墩水平存储期间,支撑应布置在底面正负弯矩相等处,可避免预制桥墩产生裂缝,保证弯矩平衡。

(2)预制桥墩水平存储期间,叠放层数一层为宜,当叠放层数为三层时,桥墩的抗拉强度将不满足规范要求,导致桥墩产生裂缝。

(3)预制桥墩水平存储期间,应根据现场实际情况来考虑支撑布置数量。

参考文献:

- [1] 郭忆.城市高架预制装配式桥梁方案研究[J].城市道桥与防洪,2017(6):95-98.
- [2] 王继全.全预制装配式桥梁方案研究[J].城市道桥与防洪,2018(4):75-77.
- [3] 黄荣,王立临.桥梁预制构件合理吊点位置确定[C]//中国公路学会,重庆市公路学会,中国西部地区公路学会.2013 年科技论文集.北京:中国公路学会,2013.
- [4] 郑晏华,装配式城市高架桥预制桥墩、桥梁的运输方法[J].建筑施工,2019,41(3):354-355.
- [5] DB41/T 1847—2019,装配式混凝土箱梁桥设计与施工技术规范[S].
- [6] TG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [7] Prestressed Concrete Institute.PCI design handbook(7th Edition)[S]. Chicago:Precast/Prestressed Concrete Institute,2010.
- [8] 常士骧,张苏民.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.

(上接第 117 页)

对性的施工监测方案。

顶推施工过程中,对主桁线形、应力、主墩变位等结构响应进行了监测。顶推施工完成后,支点抄垫实测高程与理论高程总体接近,经过合龙前的纠偏调整,合龙口的高程相对偏差满足要求;整个顶推施工过程中,关键杆件应力与计算值基本符合,桥墩变位也处于合理范围内。

由此可知,本桥施工控制取得了良好效果,对同类型桥梁的施工控制具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 苏磊.多跨简支拱型钢桁梁桥拖拉施工技术[J].铁道建筑,2019,59(12):22-25.
- [2] 陈旭勇,李建强,杨宏印,等.基于改进设备的钢桁梁顶推施工线形及应力控制[J].土木工程与管理学报,2018,35(1):43-47.
- [3] 黄小峰,王荣辉.钢桁梁制造和拼装误差对桁架内力的影响分析[J].科学技术与工程,2012,12(19):4833-4838.
- [4] 冯祁.官厅水库特大桥拱形钢桁梁顶推主桥应力控制技术[J].铁道勘察,2016,42(6):82-85.
- [5] 刘洋.下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥施工阶段主墩变位的研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.