

大跨度曲线钢箱梁桥转体施工方案研究

江知洋

(深圳高速建设发展有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 城市立交桥施工中, 往往需占道施工, 对现状交通影响较大。为降低施工对被交道路的影响, 采用先在被交道路的两侧节段拼装桥梁, 再平衡水平转体的施工方案, 最大限度减少对被交道路交通的影响。为减小曲线钢箱梁桥重心与转动轴间的偏心距, 采用支座、墩柱预设合理偏心的方法, 可大幅减小偏心距。支座向曲线内侧预设偏心, 曲线钢箱梁存在向外侧倾覆风险, 根据移动荷载最不利工况下各支座并发反力情况, 对横桥向抗倾覆两种特征状态进行分析, 确保桥梁稳定性满足规范要求。目前项目已平稳、快速施工完成, 取得了较大的社会效益和经济效益, 可为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 转体施工; 大跨度桥梁; 曲线钢箱梁; 交通影响; 抗倾覆稳定性

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0327-06

Research on Rotating Construction Scheme of Long-span Curved Steel Box Girder Bridge

JIANG Zhiyang

(Shenzhen Expressway Construction Development Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In the construction of urban overpasses, it is often necessary to occupy the road for construction, which has a significant impact on the current traffic. To reduce the impact of construction on the intersected road, a construction scheme of assembling the bridge at the both side segments of the intersected road first and then balancing the horizontal rotation is adopted to minimize the impact on the traffic of intersected roads. To reduce the eccentricity between the gravity center of the curved steel box girder bridge and the rotating axis, the method of presetting reasonable eccentricity for the supports and piers is adopted, which is able to greatly reduce the offset. The support is preset eccentric towards the inner side of the curve. The curved steel box girders are at risk of overturning to the outside. According to the concurrent reaction force conditions of each support under the most unfavorable working conditions of moving loads, the two characteristic states of anti-overturning in the transverse bridge direction are analyzed to ensure the bridge stabilization and to meet the standard requirements. At present, this project has been completed smoothly and quickly, achieving the significant social and economic benefits, which can provide reference and inspiration for similar projects.

Keywords: rotating construction; long-span bridges; curved steel box girder; traffic impact; anti-overturning stability

0 引言

在城市化迅猛发展的浪潮下, 城市汽车保有量急剧攀升, 交通拥堵问题日益凸显。市政工程的占道施工又进一步加剧了交通拥堵, 因此, “减少对既有道路交通的影响”成为跨越城市交通繁忙路段立交桥施工方案的首要考虑因素。

桥梁转体施工在施工期间能有效减少对下方既有道路的交通的影响, 为跨越交通要道的桥梁建造提供了一种可靠且高效的解决方案。

1 工程概况

深圳某立交B匝道与广深高速 39° 斜交跨越布置。广深高速作为连接广州、东莞、深圳等城市的重要通道, 对于加强大湾区内部的联系, 促进大湾区的一体化发展具有重要意义, 也是推动大湾区建设的重要支撑(见图1)。B匝道在施工期间必须确保广深高速交通安全、顺畅(见图2)。

设计采用 $(70+110+70)$ m三跨连续钢箱梁, 主跨110m跨越广深高速。桥梁纵断面设置一处变坡点, 前后纵坡分别为2.715%、-2.9%, 竖曲线为凸曲线 $R=2\,900$ m; 桥梁横坡从4%到2%之间变化; 桥梁平面设置复合曲线: $R=320\sim A-170\sim R=800$ 。

收稿日期: 2025-01-16

作者简介: 江知洋(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事高速公路建设管理工作。



图1 桥位处现状广深高速周边航拍图

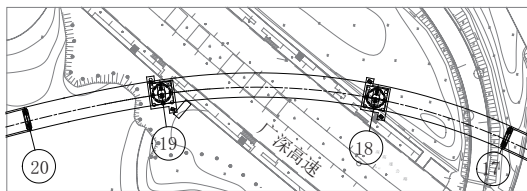


图2 跨广深高速B匝道桥位平面布置图

2 钢箱梁桥设计方案

2.1 上部结构

B匝道钢箱梁桥,采用节段拼装后转体施工。钢箱梁顶宽12.25 m,底宽8.25 m,悬臂长2.0 m,梁体高度2.8~5.0 m。箱梁为单箱双室结构。箱梁顶板厚度,根据纵向受力不同分为16、24、30、35 mm四种;底板厚度为16、24、30、35四种;腹板厚度为14、20 mm两种^[1]。

钢箱梁主要由顶板、底板、腹板及各自的加劲肋组成,在钢箱梁中每3 m设一道横向隔板,每道隔板之间加设一道腹板竖向加劲肋,在支座附近,横隔板加密,以增强其整体刚度^[2]。

钢箱梁顶板采用U形闭口肋为主,悬臂端部设板肋的正交异性桥面板结构;底板采用T型开口肋的正交异性板结构。顶板U肋采用725 mm×8 mm,最大间距550 mm,板肋采用180 mm×16 mm,最大间距300 mm;腹板纵向加劲肋采用180 mm×16 mm板肋。顶板加劲肋及腹板加劲肋全桥连续,底板加劲肋除在中间支座附近断开并焊连在横隔板上外,其余位置处均连续^[3]。

顶板、底板不同板厚对接时,厚度的变化都在箱外侧进行,保持箱内侧平顺^[4]。箱体各分块、分段全部采用焊接连接。

钢箱梁顶面设置聚丙烯纤维混凝土现浇层,厚10 cm。

钢箱梁跨中、中支点标准横断面见图3、图4。

2.2 下部结构

桥梁中间墩(18#墩和19#墩)上半部分采用矩形

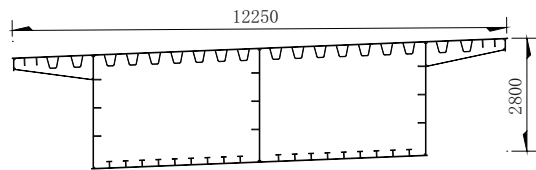


图3 钢箱梁跨中标准横断面(单位:mm)

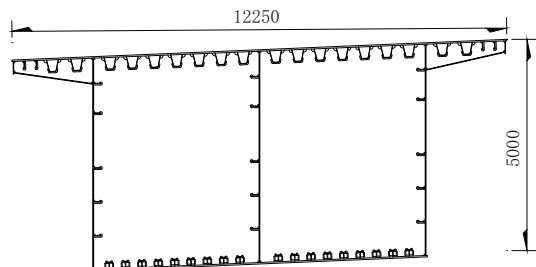


图4 钢箱梁中支点标准横断面(单位:mm)

墩,截面尺寸为8.25 m×3.4 m,为提高桥墩的防撞能力,外套厚16 mm钢板;中间墩下半部分为转体系统,截面为11.0 m×11.0 m正方形,高3 m;承台截面为13.0 m×13.0 m正方形,高2.5 m,下设9根直径1.6 m桩基础。

桥梁边墩(17#墩和20#墩)为1.6 m×1.6 m矩形双柱墩,上设1.6 m高矩形盖梁,下设两根直径2.0 m桩基础。

3 转体施工关键技术研究

3.1 减小曲线转动体不平衡力矩的措施

本工程转动体为复合曲线钢箱梁,桥面横坡单向2%~4%,钢箱梁底板横桥向保持水平,通过箱梁内外侧腹板不同高度形成横坡,因此,转体部分钢箱梁重心与桥梁中心线存在一定偏移。

通过建立钢箱梁三维模型(见图5),模拟实际施工过程,精确计算转体钢箱梁重心,然后采用主梁支座、墩柱预设合理偏心的措施,确保转体部分重心与球铰中心基本重合,达到减小转体施工配重荷载的目的。

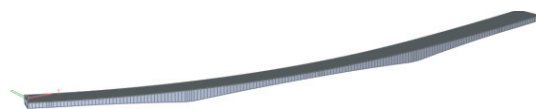


图5 全桥计算模型(使用阶段)

全桥计算模型中,桥梁中心线按桥梁实际平面线形用长度不大于0.5 m直线拟合,不考虑桥梁纵坡影响;顶板、底板、腹板及其加劲肋根据实际尺寸、厚度采用板单元模拟,隔板及其加劲肋根据实际尺寸、厚度计算自重后,按线荷载横桥向加载在板单元上。

18#、19#墩横向布置见图6、图7。18#、19#墩转动体偏心距计算见表1、表2。

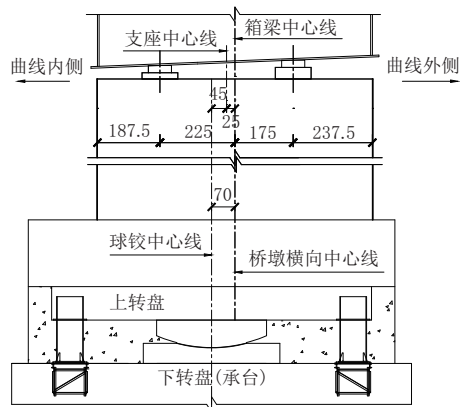


图6 18#墩横向布置图(单位:cm,未示牵引系统)

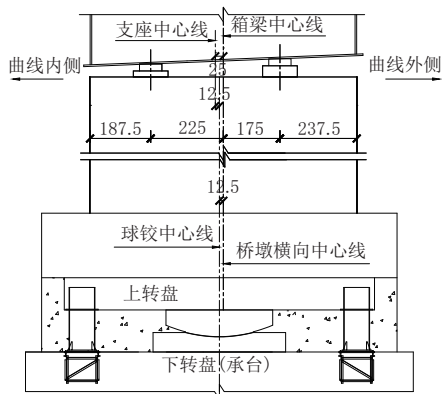


图7 19#墩横向布置图(单位:cm,未示牵引系统)

表1 18#墩转动体偏心距计算表

序号	项目	数值/kN	与球铰中心距离/m	力矩/(kN·m)
1	内支座反力	11 607	-1.55	-17 991
2	外支座反力	5 029	2.45	12 321
3	墩柱自重	8 126	0.7	5 688
4	上承台自重	8 164	0	0
5	力矩和		18.2 kN·m	
6	偏心距		0.001 m	

注:支座反力、自重:以向下为正,向上为负;
力矩:顺时针转向为正,以逆时针转向为负。

表2 19#墩转动体偏心距计算表

序号	项目	数值/kN	与球铰中心距离/m	力矩/(kN·m)
1	内支座反力	6 537	-2.125	-13 891
2	外支座反力	7 044	1.875	13 208
3	墩柱自重	5 749	0.125	719
4	上承台自重	8 164	0	0
5	力矩和		-36.6 kN·m	
6	偏心距		-0.001 m	

注:支座反力、自重:以向下为正,向上为负;
力矩:顺时针转向为正,以逆时针转向为负。

根据上述计算分析,18#墩主梁支座中心线横向间距4 m,支座中心线向曲线内偏移250 mm;支座中心线相对球铰中心线外偏450 mm,墩柱上半部分相对球铰中心线外偏700 mm,转体部分理论重心与球

铰中心偏心距为:1 mm。
19#墩主梁支座中心线横向间距4 m,支座中心线向曲线内偏移250 mm;支座中心线相对球铰中心线内偏12.5 mm,墩柱上半部分相对球铰中心线外偏12.5 mm,转体部分理论重心与球铰中心偏心距为:-1 mm。

通过上述计算分析结果可知:根据各钢箱梁段的曲线参数,对主梁支座、墩柱预设合适偏心值后,在转体施工过程中,转体部分理论重心与球铰中心基本重合,大幅减小平衡配重配重和牵引系统的工程量。

曲线钢箱梁支座向内预设偏心后,存在向曲线外侧倾覆风险,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)相关条款验算桥梁横向倾覆稳定性。

桥梁支座反力最小值见图8。钢箱梁桥抗倾覆荷载数值见表3。钢箱梁桥抗倾覆稳定性系数计算见表4。



图8 桥梁支座反力最小值(基本组合,单位:kN)

表3 钢箱梁桥抗倾覆荷载数值表

项目		支座编号	
		17-1	17-2
l_i /m		5	0
R_{GK} /kN		1 448	1 427
支座竖向力	$R_{Qki,171}$ /kN	-390	-163
	失效支座对应汽车荷载标准值		
	$R_{Qki,181}$ /kN	-44	256
	$R_{Qki,191}$ /kN	252	575
$R_{Qki,201}$ /kN		-213	122

注:支座编号:N为墩台编号,-1表示内侧支座,-2表示外侧支座;
支座竖向力:以向下为正,向上为负。

表3 钢箱梁桥抗倾覆荷载数值表(续表)

支座编号					
18-1	18-2	19-1	19-2	20-1	20-2
4	0	4	0	5	0
13 652	12 052	11 003	12 300	1 915	2 019
0	2 442	143	3 069	-219	160
-634	2 471	-397	2 761	174	561
-320	3 238	-753	1 965	-56	288
58	3 050	63	2 393	-395	-171

注:支座编号:N为墩台编号,-1表示内侧支座,-2表示外侧支座;
支座竖向力:以向下为正,向上为负。

通过上述计算分析结果可知:曲线钢箱梁支座预设偏心后,在作用基本组合下,支座最小竖向力均

表4 钢箱梁桥抗倾覆稳定性系数计算表

项目	支座编号			
	17-1	18-1	19-1	20-1
稳定效应 $\Sigma R_{Gki} l_i / (kN \cdot m)$	7 238	54 607	44 011	9 577
失稳效应 $/(kN \cdot m)$	$\Sigma R_{Qki,171} l_i$	-3 047		37.9
	$\Sigma R_{Qki,181} l_i$	-4 342	稳定性系数	26.6
	$\Sigma R_{Qki,191} l_i$	-4 575		25.2
	$\Sigma R_{Qki,201} l_i$	-3 042		37.9

注:支座编号:N为墩台编号,-1表示内侧支座,-2表示外侧支座。

为正值,处于受压状态,满足特征状态1相关要求;按作用标准组合计算的横桥向抗倾覆稳定性系数大于2.5,满足特征状态2相关要求^[5],桥梁横向倾覆失稳风险较低。

3.2 最大悬臂状态下稳定性分析

转动过程为结构的最大悬臂状态,也是最不安全状态,选取最大转体单元18#墩(60.8+60.8)m为计算模型(见图9),在极端荷载作用下,验算转动体稳定系数。

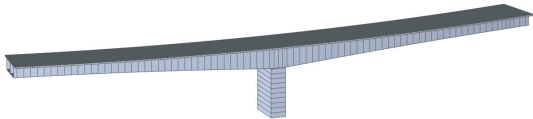


图9 最大悬臂状态稳定分析模型(18#墩)

最不利荷载工况分别为:(1)结构恒荷载及偏心:根据桥梁平面线型和预设偏心值,由程序自动计算;(2)恒荷载施工偏差:仅单侧悬臂段恒荷载增加5%,另一侧不增加也不减少;(3)风荷载:按深圳50 a一遇基本风压(0.75 kPa)取值,顺桥向风荷载作用在墩柱上,竖向风荷载(向下)仅作用于单侧悬臂段;(4)转体倾斜:按撑脚间隙6 mm加允许最大偏差3 mm,根据几何关系计算墩柱偏心距;(5)施工荷载:在加载竖向风荷载一侧悬臂最远端加载200 kN集中荷载。

转体施工阶段稳定性计算见表5。

通过上述计算分析结果可知:最大悬臂状态下,极端荷载作用下,钢箱梁转动体抗倾覆稳定系数大于1.3,满足规范要求^[6]。

3.3 施工期间墩梁临时固定措施

钢箱梁施工期间,墩顶顺桥向距桥墩中心线两侧各1.85 m处设1排临时锚固钢棒(见图10)。钢棒每排8根,直径70 mm,材质42CrMo。上端锚固于钢箱梁底板上的锚固纵梁上,下端锚固于墩柱外预设锚固牛腿上,锚固点均配双螺母。

表5 转体施工阶段稳定性计算表

荷载	竖向力/ kN	对距球铰最远撑脚 支撑面力矩/(kN·m)	备注
结构恒荷载及偏心	32 926	-139 936	
单侧5%恒荷载施工偏差	349	4 695	
风荷载	206	6 217	
转体倾斜	0	325	竖向力已计入结构恒荷载
施工荷载	200	11 609	
稳定力矩/(kN·m)		-139 936	
倾覆力矩/(kN·m)		22 846	
稳定系数		6.1	

注:竖向力:以向下为正,向上为负;
力矩:顺时针转向为正,以逆时针转向为负。

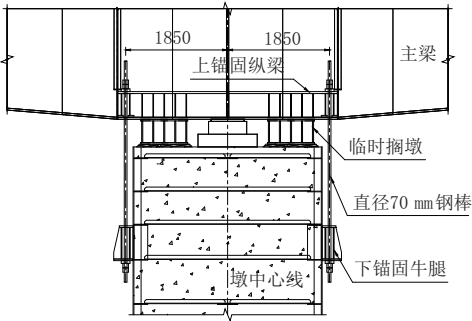


图10 临时墩梁固结构造图(顺桥向,单位:mm)

4 钢箱梁桥转体施工方案

4.1 施工顺序

根据钢梁结构尺寸、重量及运输条件,在广深高速路线外侧平整场地,修建进出道路,安装拼装临时墩。钢梁纵向分13段,横向分3块,由于中支点梁高5 m,在中支点处分两层,全桥钢箱梁共划分53块,采用汽车吊逐块吊装至临时墩上进行拼装焊接。

钢梁拼装完成后,将中间墩与钢梁临时固结,开始转体:18#墩转体段长度(60.8+60.8)m,转体角度为逆时针转体28°,19#墩侧转体段长度(47.7+47.7)m,转体角度为逆时针转体47°。钢梁转体到位后,复测钢箱梁的线型和各个控制点标高,满足规范要求后锁定转盘,完成转盘结构固结。最后,在边墩处搭设支架,先边跨合拢,再中跨合拢,完成体系转换,拆除临时支架^[7]。

施工平面布置见图11。

4.2 转体施工工艺

4.2.1 转体系统

桥梁中间墩(18#墩和19#墩)下半部分为转体系统,由转体下转盘、球铰、撑脚与滑道、转体上转盘、转动牵引系统组成。

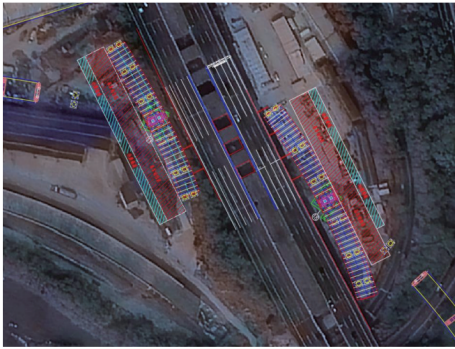


图 11 施工平面布置图

本工程采用工厂预制钢制球铰(见图 12),直径为 2 250 mm,中心设直径 240 mm 钢棒转动轴。



图 12 球铰现场安装照片

环道滑道中心直径 8.5 m,直径与转动体悬臂长度比值为 1/7.15。滑道采用 900 mm 宽,2 mm 厚不锈钢板铺设。

上转盘下设有 8 对撑脚,均匀、对称分布于环道滑道上方,每对撑脚为双圆柱形,撑脚采用钢管混凝土组合结构(见图 13),钢管规格均为 800 mm×16 mm,C50 微膨胀混凝土填充。滑道与撑脚间距设 6 mm 间隙。



图 13 撑脚现场安装照片

上转盘直径 9.6 m,高 1 m,设纵、横向预应力钢筋。内预埋 13- $\phi_{15.2}$ 转体牵引索,同一对索的锚固端在同一水平面上并对称于圆心布置,每对索的出口点也对称于转盘中心。

待上转盘混凝土达到设计强度后,进行整个转动系统支承体系的转换:抽去垫板使上转盘支承于球铰上,施加转动力矩,使上盘绕球铰中心轴转动。

检查球铰的运转是否正常,测定其摩擦系数,为转体施工提供依据。

本工程转动牵引系统采用两台智能自动连续张拉千斤顶(ZLD-1200 型)。

4.2.2 转体施工步骤

(1)临时支墩拆除

全部转体钢箱梁环焊缝完成,经检验合格后,可由支点向两侧依次卸载临时支墩与钢箱梁间的沙箱,再拆除临时支墩上部的横梁及立柱。

(2)牵引力系统测试

转动牵引系统安装完成后,按静摩擦系数按 0.2,动摩擦系数按 0.06,反算各泵站油压值,调整好泵站的允许油压,空载试运行,检查设备运行正常。

(3)称重,布配重

在转体前需进行称重试验,测试前期根据桥梁三维模型计算预设偏心后,在实际施工偏差影响后转动体部分的不平衡力矩,以及相应的配重方案。具体过程可参考相关规范及文献,本文不再赘述。

(4)试转

试转目的:根据本工程场地情况,试转角度 5° ,弧长 6.54 m。试转应取得千斤顶行程对应的转盘角度和梁体弧长参数,牵引系统性能,转动梁体的平衡状况;测定摩擦系数,测试各状态的牵引力,记录施工关键数据同时发现、处理设备存在的故障问题。

试转步骤:a.用千斤顶逐根、对称预紧钢铰线,重复数次后,保证各根钢铰线受力均匀,并平行地缠于上转台上。b.启动泵站,控制两台主千斤顶同时施力试转,以克服静摩阻力使桥梁转动体转动。c.试转时,收集以下两个重要数据:桥梁转速、每点动一次悬臂端所转动的水平弦线距离,为后续转体的精确定位提供操作依据。d.试转过程中,应全程监测结构的平衡状态和关键受力部位的外观情况。e.试转结束后,立即在撑脚与环道钢板之间采用钢楔块楔紧并临时固定,将转体系统临时锁死。

(5)正式转体

根据试转取得的转体施工操作数据,经计算分析后确定转动角速度不大于 0.02 rad/min,梁体悬臂端线速度不大于 1.5 m/min^[8]。外部、天气条件具备后,可立即开始正式转体工作。

转动过程中测量人员须反复观测轴线偏位、梁端部位高程变化,并将数据实时报告给控制系统操作人员,便于其操作控制系统保证转体顺利完成。

测量数据报告频次:开始转动时每转动 5° 报告一次;转体角度剩余 2° 时开始降速,中心轴线合拢前1 m内时,每转动100 mm报告一次;中心轴线合拢前500 mm内开始转为点动操作,每转动50 mm报告一次;中心轴线合拢前300 mm内每10 mm报告一次。

采用点动方式使梁体轴线精准就位:点动状态下设备千斤顶采用定距模式,定距精度1 mm,牵引速度0.005 rad/min。

转体结构精确就位后,利用转盘底设置的千斤顶调整梁体姿态和端部标高,梁体轴线偏差不应大于10 mm,高程偏差不应大于20 mm^[8]。满足要求后,立即在8组撑脚处打入钢楔块,并将钢楔块焊接固定在滑道上,再在每个方向采用8根 $\phi 32$ 的钢筋暂时连接上下转盘,保证转体单元不再产生位移。

(6)约束锁定

转体到位后,按以下步骤进行约束锁定:a.撑脚处焊接:采用钢楔块进行抄垫固定,并将钢楔块同撑腿支撑底面钢板、下盘环道预埋钢板立即进行焊接联接。b.转盘钢筋连接:将上、下转盘预埋的接茬钢筋采用双面搭接焊。c.封铰混凝土施工:混凝土采用分层浇筑分层振捣,分层厚度不超过300 mm,浇筑后完成转盘结构固结。

(7)边跨合龙

在边跨合龙口,设置为双排钢管支架,转体施工完成后,在支架上增设梁底垫块和调节千斤顶。

合龙前需要对合龙段进行连续48 h观测,观测间隔为2 h,每次观测时记录观测时间、气温、风速等环境因素。根据合龙段的测量数据,并考虑环境因素的影响,计算合龙段长度、高差、轴线偏位等数据^[9]。

合龙段钢梁制造长度考虑15~20 cm富余量,确定合龙时间及气温后,按实测合龙段数据并考虑环境因素修正后,现场对合龙进行配切。梁段吊装就位后,进行锁定及焊接施工,最后拆除梁底垫块和调节千斤顶,完成边跨合龙。

(8)中跨合龙

中跨合龙的观测,合龙段配切方案与边跨合龙段一致,合龙段接缝设置成企口,上宽下窄,以便于合龙段下放合龙。

因中跨合龙段桥下不具备吊车站位条件,采用25 t吊车上桥吊装方案。为确保桥梁结构及吊装安全,将合龙段分为4块:底板(1块)、边腹板+顶板(2块)及中腹板+顶板(1块)。先安装底板块,再安装中腹板块,最后安装两侧边腹板块。

5 结 语

本项目为深圳首次使用转体施工的大跨度曲线梁,也是省内首座在跨越城市主干道施工不封闭道路实现双幅空中转体的曲线桥。

桥梁跨径布置为:70 m+110 m+70 m,平面曲线最小半径320 m,单个桥墩上部钢箱梁转体最大重量约1 600 t,钢箱梁自重较大,重量分布不均衡。通过主梁支座和桥墩预设偏心,提前对转体桥进行称重、配重并试转等措施,最终实现了平稳转动。

桥梁两个中墩分别逆时针转体 28° 、 47° ,转体施工仅历时42 min。大幅缩短了跨越高速公路的施工时间,最大限度减少对高速公路行车的影响。

转体就位后,合拢口相对高差及轴线偏差控制在毫米级,完工后,桥梁动、静载试验均满足设计及规范要求,为高质量完成本工程奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 赵廷衡.桥梁钢结构细节设计[M].成都:西南交通大学出版社,2011.
- [3] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [4] 交通运输部公路局,中交公路规划设计院有限公司.公路常规跨径钢结构桥梁建造技术指南[M].北京:人民交通出版社,2019.
- [5] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] DG/TJ 08-2220—2016,上海市工程建设规范桥梁水平转体法施工技术规程[S].
- [7] Q/CR 9603—2015,高速铁路桥涵工程施工技术规程[S].
- [8] DB42/T2249—2024,湖北省地方标准桥梁水平转体技术规程[S].
- [9] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].