

上跨铁路转体桥梁设计与施工关键技术

张文进¹, 曹文²

(1.中国华西工程设计建设有限公司, 广东 广州 510062; 2.中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731)

摘要:深圳市外环高速公路上跨广深铁路桥梁采用两跨预应力混凝土变高度T形刚构箱梁,跨径为 2×82.5 m,桥面宽33 m,平面转体法施工,转体角度 72.342° ,转体结构悬臂长度为 2×73.5 m,转体重量为2.4万t,刷新了中国铁路广州局集团管辖范围内转体桥梁宽度和重量记录。在该桥试转体阶段,通过称重试验、试转试验和点动试验,为正式转体提供了技术参数,确保了转体顺利进行。该桥的建成保证了深圳市外环高速公路按计划顺利通车,为我国大吨位转体桥梁设计与施工积累了宝贵经验。

关键词: T形刚构箱梁桥;转体施工;上跨铁路桥梁;球铰;试转体试验

中图分类号: U448.17

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0125-04

0 引言

根据铁路管理部门要求,上跨铁路桥梁应充分考虑施工对铁路运营的影响,一般有3种可行的建设方案:

- (1)架桥机施工,搭设防护棚防护;
- (2)挂篮悬臂施工,搭设防护棚防护;
- (3)转体法施工。

根据《中国铁路总公司运输局关于穿(跨)越高速铁路营业线和临近工程等方案审查有关问题的通知》(运工桥隧函[2013]316号)及《国铁集团工电部关于加强穿(跨)越铁路营业线和邻近营业线工程方案等审查和施工安全管理的通知》(工电桥房函[2020]48号),上述3个可行方案中,应优先选用转体施工方案,当受场地条件限制,无法采用转体施工方案时,需经专家论证。因此,越来越多的上跨铁路桥梁采用转体法施工,相关行业从业人员亟需学习该工法的设计及施工经验。

本文以深圳市外环高速公路上跨广深铁路桥转体桥梁为依托,总结该转体桥梁设计及施工的关键技术。

1 工程概况

深圳市外环高速公路位于深圳市北部,西起沿江高速,东至盐坝高速,全长93.2 km,由深圳段75.8 km,东莞段17.4 km组成,双向6车道。沿线与

沿江、广深、南光、龙大、梅观、清平、博深、深惠、深汕、东部沿海等10条高速,以及南坪三期相接,往西通过虎门大桥与佛山、中山、番禺等市相连;路线穿过东莞凤岗,向北通过莞深、龙大、博深等纵向高速与东莞相连;往东通过深汕、深惠高速与惠州、汕尾等市相连。

该项目在K40+893.3处与现状广深铁路交叉,道路中心与铁路斜交 72.3° ,交叉点广深铁路里程为K119+273,位于樟木头站至平湖站区间。

广深铁路共有4股道,I、II线通行广深城际动车组,运营速度200 km/h,按高速铁路管理;III、IV线通行货运铁路,运营速度140 km/h,按普速铁路管理。上跨处位于直线段,铁路为路堤段,路堤宽度约23 m,东侧为农田,西侧为塘天南路。

为减小桥梁施工对铁路的影响,经过多轮方案比选,拟建上跨桥梁采用 2×82.5 m预应力混凝土T形刚构体系,平面转体法施工,桥面整幅布置,主墩设在广深铁路东侧,一跨跨越广铁铁路和塘天南路。桥下最小净高为9.72 m,公路桥墩外边缘距离外侧铁路中心最小距离为19.90 m,梁体预制时梁体结构距离外侧铁路中心最小距离为10.11 m。主桥桥型布置如图1所示。

该转体桥梁于2020年9月18日完成转体施工,深圳市外环高速公路于2020年12月28日全线通车。

2 主要技术指标

2.1 桥梁设计标准

(1)道路等级:高速公路。

收稿日期: 2021-02-25

作者简介: 张文进(1987—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

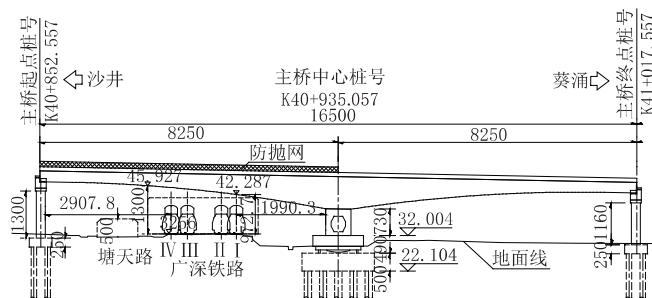


图1 桥型布置图(单位:m)

(2)设计行车速度:100 km/h。

(3)汽车荷载等级:1.3×公路-I级。

(4)地震动峰值加速度0.05g,抗震设防基本烈度为6度,按Ⅶ度设防。

(5)桥面宽度:33 m=0.5 m(SS级防撞墙)+15.25 m(行车道)+0.5 m(内防撞墙)+0.5 m(中分带)+0.5 m(内防撞墙)+15.25 m(行车道)+0.5 m(SS级防撞墙)。

2.2 转体系统设计标准

(1)转体结构:T构,跨径2×82.5 m,转体悬臂长度2×73.5 m,桥宽33 m,转体重量240 000 kN。

(2)球铰承载力:设计承载力252 000 kN。

(3)球铰尺寸:平面半径2.25 m,球面半径16.95 m。

(4)转体角度:顺时针水平转体72.342°。

(5)转体速度:角速度0.02 rad/min,最大悬臂端线速度1.49 m/min,理论转体作业时间为63.1 min。

(6)牵引参数:牵引半径6.25 m,静摩擦系数取0.1,单侧启动牵引力3 024 kN。

(7)结构偏心:转体施工前调整后结构偏心值不大于0.05 m。

(8)风荷载:基本风速为13.8 m/s(相当于6级风),基本风压取0.13 kN/m²。

3 主梁结构设计

上部结构为(82.5+82.5)m变高度T形刚构箱梁桥,采用C55混凝土,三向预应力体系,纵向按全预应力构件计算。主桥箱梁采用直腹板单箱四室结构,中支点梁高9 m,高跨比为1/9.167;边支点梁高3.0 m,高跨比为1/27.5。箱梁顶板宽33 m,底板宽25 m,翼缘板悬臂长为4 m。箱梁高度从距墩中心3.5 m处到合龙处按2次抛物线变化,箱梁在主墩墩顶0号块梁段、边直段分别设置了2道厚2 m和1道厚1.9 m的横隔板。顶板厚28 cm,底板厚度30~100 cm,腹板厚度50~80 cm。主梁共利用8 106.3 m³ C55混凝土,522 t钢绞线,1 730 t普通钢筋。

主桥连续箱梁(转体段)采用支架现浇法施工。转体梁段分段长度为21 m(0号块)、18 m(1号块)、24 m(2号块)、21 m(3号块),边跨现浇长6.44 m,合龙段长2.5 m。主梁结构设计如图2所示。

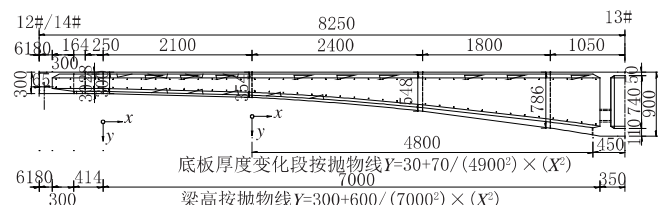


图2 主梁结构设计图(单位:cm)

主墩采用矩形空心墩,墩身横桥向顶部宽度为25 m,墩底宽度为16 m,顺桥向总宽7 m。主墩顶部与梁体固结,底部与转体结构的上承台固结。上承台高3 m,平面尺寸为14 m×17 m。上承台下为上转盘,上转盘高1 m,直径12.5 m。

主墩承台厚度为5.0 m,承台平面尺寸为20 m×22 m。基础采用5×5根钻孔灌注桩群桩基础,桩基直径为2 m,桩间距4.7 m。

反力座设置在主墩承台,并与主墩承台一起浇筑。

4 转体系统设计

该工程转体重量较大,采用钢制球铰作为转体施工的转心和承重体系,按中心支撑体系设计。转体系统总图如图3所示。

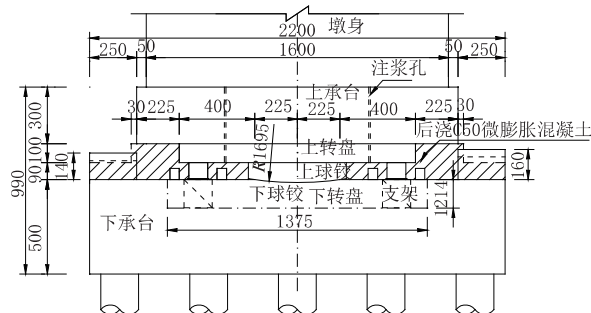


图3 转体系统总图(单位:cm)

转体系统由上下承台、上下转盘、上下球铰、撑脚、滑道、定位骨架、牵引系统等组成,转体系统以球铰支承为主,撑脚起抗倾覆作用。转体系统设计承载力252 000 kN,采用双侧同步液压连续千斤顶作为牵引动力施加转动力矩。

该桥转体吨位较大,球铰结构复杂,设计中采用专利技术《一种转体球铰》(ZL 201420224156.3)^[1]。

球铰包括上球铰、下球铰、定位销轴、型钢定位骨架、耐磨聚四氟乙烯滑板等构件,为转体结构的转动中心,同时承受并传递转体结构全部重量。

上球铰位于上转盘底部,为凸面,下球铰位于下

转盘上,为凹面。球铰平面半径 2.25 m,球面半径 16.95 m。为防止球铰在加工、运输过程中变形,同时加强与上、下盘之间的混凝土连接,球铰背面设置环形及放射形加劲肋。球铰中心设置 $\phi 300$ mm 钢制定位销轴,定位轴套穿透于上下球铰。球面板采用 40 mm 厚 Q345B 钢板,加强肋板采用 Q235B 钢板,销轴采用 45# 锻钢。

上下球铰之间设耐磨聚四氟乙烯滑板,容许压应力不小于 100 MPa,黏结在下球铰的凹球面上,板上设储脂坑,坑内充满润滑硅脂。现场安装如图 4 所示。



图 4 下球铰滑板安装

撑脚共 8 个,中心位于 $R=5.25$ m 的圆环上,采用钢管混凝土结构,钢管采用 Q345B 钢材,厚度 16 mm,外径 100 cm,内填 C50 微膨胀混凝土。钢管下设 3 cm 厚走板,走板底面加工精度为 3 级。

滑道环形钢板厚 2.4 cm,通过螺栓与骨架连接,安装就位后通过螺栓精确调整环形滑板高度,保证撑脚走板与滑道间的缝隙为 15 mm。

上转盘直径 6.25 m,采用 C50 预应力混凝土结构,施工前首先安装临时支撑。临时支撑含砂箱及混凝土临时支墩,砂箱均匀布置于滑道上方的撑脚之间,共 8 个;混凝土临时支墩设置于上转盘四周,共 4 个。转体施工前拆除砂箱和混凝土临时支墩。

牵引系统由牵引索、牵引反力座及牵引动力设备三部分组成。该桥单侧启动牵引力设计值为 $T_1=3\,024$ kN,牵引索采用 4 束 $13\Phi^{*}15.24$ 的钢绞线,抗拉强度 1 860 MPa,以 P 锚形式预埋在上转盘内。牵引反力座采用 C50 钢筋混凝土结构,设于下转盘承台上,共 2 个,尺寸为 $2.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ (1.4 m)。牵引动力设备采用连续张拉千斤顶,为保证两台千斤顶同步工作,要求千斤顶油泵并联,并同时具备自动控制和手动控制两种功能。

5 转体施工

应尽量选择无风或微风天气转体施工,风力高

于 5 级时不得转体。

转体前应进行称重试验,测定结构平衡情况,如不满足平衡要求须配重。转体施工前应进行试转体,检查平转牵引系统的性能、整体平衡状况、测试摩擦系数、最大启动力,为正式平转做准备,并应记录点动试验结果^[2]。

5.1 现场称重试验

现场称重采用规范^[2]建议的球铰转动法测定。解除上下承台的临时固结后,支墩及撑脚和滑道钢板有接触,说明球铰摩阻力矩小于不平衡力矩,千斤顶布置在较重一侧,如图 5 所示。

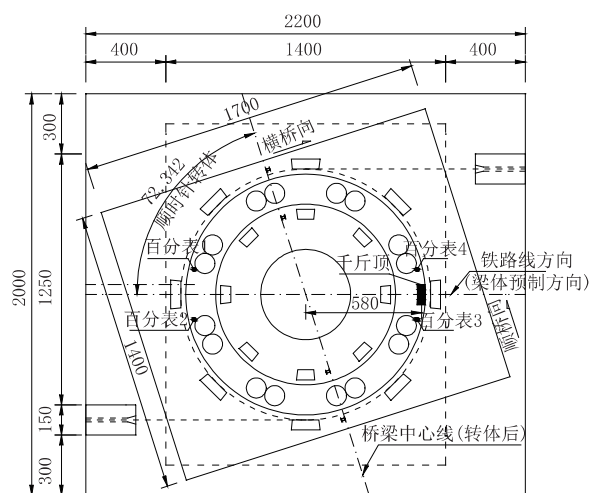


图 5 平衡称重试验千斤顶及位移计布置图(单位:mm)

测试得知:千斤顶同步均匀加载,当总荷载 $P_{升}$ 逐级加载到 26 040 kN 时,球铰发生微小转动;千斤顶逐渐回落过程中,当总荷载 $P_{落}$ 逐级减载到 6 500 kN 时,球铰发生微小转动。由此分析得出不平衡力矩:

$$M_G = \frac{(P_{升} + P_{落}) \cdot L}{2} = \frac{(25\,400 + 6\,500) \times 5.8}{2} = 92\,510 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

式中: M_G 为不平衡力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; $P_{升}$ 为梁体顶升时的千斤顶反力, kN ; $P_{落}$ 为梁体回落时的千斤顶反力, kN ; L 为千斤顶与球铰的中心距, m 。

转动体摩阻力矩:

$$M_Z = \frac{(P_{升} + P_{落}) \cdot L}{2} = \frac{(25\,400 - 6\,500) \times 5.8}{2} = 54\,810 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

式中: M_Z 为转动体的摩阻力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

转动体偏心距:

$$e = \frac{M_G}{N} = \frac{92\,510}{25\,400} = 0.385 \text{ m} \quad (3)$$

式中: N 为转体系统设计承载力, kN 。

根据实测结果可知,转动体偏心距为 38.5 cm > 5 cm,因此需要在较轻侧配重。经计算在距离梁端 2

m处,沿腹板位置均匀布置50块混凝土立方体,每块重2.6 t,配置总重量1 293 kN,调整后计算偏心距约为0 cm,可满足平衡转体要求。

5.2 试转试验

试转时测量转动体系的启动牵引力和转动牵引力,然后计算静、动摩擦系数,通过三次牵引力测试,测试结果见表1。

表1 牵引力测试记录表

测试阶段	启动牵引力/kN	转动牵引力/kN
第1次	2 440	938
第2次	2 338	924
第3次	2 290	860

通过三次测试结果,转动体系的平均启动牵引力为2 356 kN,平均转动牵引力为907 kN。

由转体牵引力计算公式^[3]:

$$T = \frac{2fGR}{3D} \quad (4)$$

式中: T 为转体牵引力,kN; f 为摩擦系数; R 为球铰平面半径,m, $R=2.25$ m; D 为上转盘直径,m, $D=12.5$ m; G 为转体重量,kN, $G=240\,000$ kN。

可得:启动时静摩擦系数为 $f_{\text{静}}=0.082$,动摩擦系数为 $f_{\text{动}}=0.031$ 。设计时静摩擦系数选用0.1,动摩擦系数选用0.06符合实际情况,参数选用合理。

5.3 行程点动试验

行程点动试验用于测定牵引钢绞线与梁端行程之间的相互关系,为转体最后阶段的精确就位提供依据。该项目进行1 mm、3 mm、5 mm、10 mm、20 mm行程点动试验,相应悬臂端行程为0.012 m、0.035 m、0.059 m、0.118 m、0.235 m。

5.4 转体精确定位控制

(1)转体动力系统应具有自动控制和手动控制两种功能,当主梁端部即将到达设计位置前100 cm时,采用点动操作,并与测量人员密切配合,获取点动操作时最大弧长转体数据。

(2)点动操作、精确定位前,先对上部转体结构进行水平校正。

(3)设置转体限位装置,以防超转。

(4)在梁端设置水平微调装置,在上转盘下方设置竖向千斤顶调整纵横向标高。

该工程转体过程中撑脚未着地,竖向转动得到有效控制,转体完成后水平偏差约1 cm,竖向偏差约0.5 cm。转体完成后照片如图6所示。



图6 转体完成后照片

6 结 语

该桥是深圳市外环高速公路的控制性工程,桥面宽度及转体重量均刷新了中国铁路广州局集团管辖范围内记录,施工难度大,通过该工程的建设,得到如下经验:

(1)因路线纵坡、施工误差等因素影响,对称施工同样会产生较大偏心距。正式转体前必须重视称重试验及平衡配重工序;

(2)该项目在较轻侧悬臂梁体端部附近配置重量1 293 kN的混凝土块,结构达到平衡状态,满足平衡转体要求;

(3)通过试转试验,测得静摩擦系数为0.082,动摩擦系数为0.031,说明设计时静摩擦系数选用0.1,动摩擦系数选用0.06较为合理;

(4)转体施工过程中,撑脚全程未接触滑道,与中心支撑的设计理念相符,说明中心支撑体系同样适用于宽桥面、大重量转体桥设计。

参考文献:

- [1] 傅贤超,唐英,张三峰,等.一种转体球铰:中国,201420224156.3[P]. 2014-8-27.
- [2] DG/TJ 08-2220—2016,桥梁水平转体法施工技术规范[S].
- [3] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].