

高墩大跨刚构桥平面转体关键控制技术

吴磊

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510440)

摘要: 某跨铁路桥梁采用80 m+142 m+142 m+80 m预应力混凝土连续刚构跨越6条铁路线, 为降低桥梁施工对铁路运营的影响, 采用了先平行铁路方向悬臂分节段浇筑3个T形刚构, 然后再平面转体合龙的设计方案。结合该桥的转体施工设计, 详细介绍了承重系统、牵引系统、平衡系统等关键技术分析过程。根据计算结果, 转体施工能满足桥梁施工安全和铁路运营安全需求。

关键词: 高墩; 刚构桥; 平面转体

中图分类号: U448.23

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0014-04

Key Control Technology for Plane Rotation of High-pier Long-span Ridge Frame Bridge

WU Lei

(Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510440, China)

Abstract: A cross-railway bridge is a (80+142+142+80)-m prestressed concrete continuous rigid-frame bridge spanning six railway lines. In order to reduce the impact of bridge construction on railway operations, the design scheme of pouring three T-shaped rigid frames in parallel to the railway direction by cantilever segments is adopted, followed by plane rotation closure. Combined with the rotation construction design of the bridge, the analysis process of key technologies such as load-bearing systems, traction systems and balance systems is introduced in detail. According to the calculation results, the rotation construction can guarantee the safety of bridge construction and the requirements of railway operation.

Keywords: high pier; rigid-frame bridge; plane rotation

0 引言

桥梁结构施工过程中, 或受高山峡谷、深水急流的限制, 或受既有道路安全边界的制约, 无法按常规的施工方法循序渐进建造桥梁, 而采用转体方法施工则能够巧妙地避开上述限制。采用转体方法施工桥梁, 不仅可以极大地改善现场的作业条件, 而且还能避免施工过程中可能遇到的风险^[1-3], 例如影响桥下船舶、公路车辆及铁路车辆安全行驶等情况。

1 工程概况

某改扩建高速公路先后跨越广深铁路(Ⅲ、Ⅳ线)、莞塘深上行联络线、广深铁路(Ⅰ、Ⅱ线)、莞塘深下行联络线6条铁路线, 然后与东深公路设置林村互通, 终点接入从莞深高速塘清枢纽, 工程地理

位置如图1所示。



图1 工程地理位置图

根据路线整体走向、边界条件以及与铁路相关的规范规定, 涉铁段采用80 m+142 m+142 m+80 m预应力混凝土转体刚构桥(简称跨铁桥)跨越6条铁路线, 其桥型布置如图2所示。跨铁桥成桥后梁底距离广深铁路Ⅲ、Ⅳ线轨面最近距离14.99 m, 距离莞塘深上行联络线轨面最近距离17.06 m, 距离广深铁路Ⅰ、Ⅱ线轨面最近距离27.66 m, 距离莞塘深下行

收稿日期: 2024-12-24

作者简介: 吴磊(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁结构设计与计算工作。

联络线轨面最近距离 7.33 m。

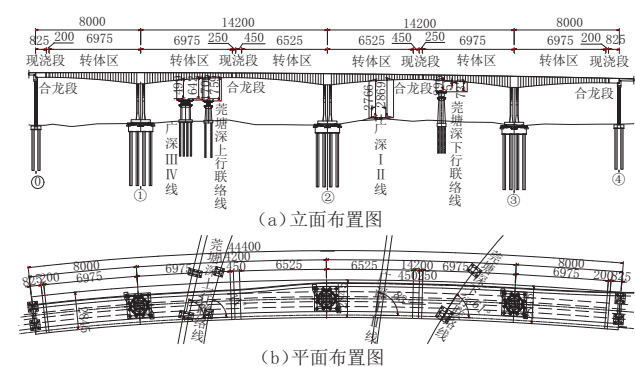


图 2 跨铁桥桥型布置图(单位:cm)

跨铁桥上部结构箱梁顶板全宽 28.45 m,采用单箱三室箱形断面,底板宽 21.45 m,两侧翼缘板悬臂宽 3.5 m,主墩墩顶处断面高度 8.4 m,边支座和跨中处断面高度 3.5 m,梁高按抛物线变化,抛物线幂次取 1.8。主墩采用双肢薄壁墩,1 号墩高 26.7 m,2 号墩高 26.9 m,3 号墩高 25.9 m,主墩平面尺寸 13.5 m(横桥向)×6 m(顺桥向)。

由于跨铁桥紧邻 6 条铁路线,施工作业面狭窄,且跨度大靠近铁路位置无法搭支架,因此采取先平行既有铁路悬臂分节段浇筑 3 个 T 形刚构,然后再平面转体合龙的设计方案;同时,鉴于主墩墩高较高,转体重量较大,墩顶转体结构复杂、作业空间狭小、操作困难^[4-6],最终采用墩底转体方案^[7-8]。1、2、3 号主墩 T 构的转体总重量分别为 2.24 万 t、2.23 万 t 和 2.22 万 t,3 个主墩 T 构的转体角度分别为顺时针转体 74°、82°和 56°,结构指导性转体施工如图 3 所示。

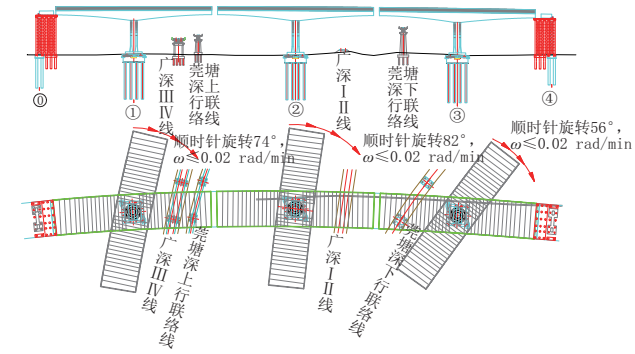


图 3 指导性转体施工图

2 桥梁转体施工关键技术分析

平面转体施工关键技术包括承重系统、牵引系统和平衡系统,本文重点分析平面转体施工 3 个主要系统的设计与施工^[9-10]。

2.1 承重系统

承重系统是支撑上部转体结构重量的基础,由上承台、下承台、球铰 3 个部分构成,其立面见图 4。

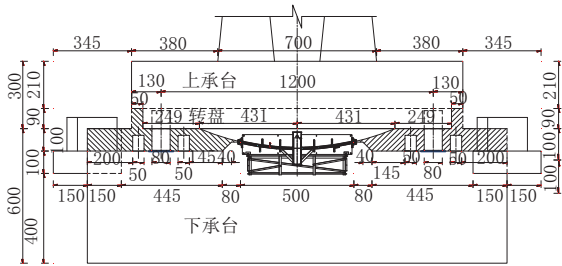


图 4 承重系统立面图(单位:cm)

上承台即为主墩承台上部转体前浇筑部分,是转体过程中的重要结构,其在结构转动过程中处于多向、立体的复杂受力状态,因此按照三向预应力体系进行设计;上承台的平面长、宽尺寸均为 14.6 m,厚度为 3 m。在上承台正下方设有圆柱形转盘,转盘直径 $\phi 13.6$ m,高度 0.9 m,转盘的外侧设有撑脚,下方与球铰组成整体。转盘是结构转动时牵引索直接作用的部分,一般在同一个转盘内部预埋一对(2 根)锚点径向对称布置的牵引索,牵引索采用单端张拉,其一端固定在转盘内部,一端连接在牵引台座的千斤顶上。为确保结构能够顺利转动到位,每根牵引索在转盘内的工作长度不小于 5 m,具体需根据最大转动角度和转盘半径计算确定。

下承台即为主墩承台下部转体前浇筑部分,在转体完成后,与上承台共同形成整体。下承台厚度为 5 m,顶面设用于安装下球铰的混凝土凸台,凸台呈圆台状,顶面半径为 2.9 m,底面半径为 3.3 m,高为 0.4 m,凸台顶面设凹形球冠状凹面,凹面平面投影半径为 2.5 m,球面半径 11.008 m。下球铰及定位销轴安装于凸台平面中心。下承台顶面设有下球铰、直径为 12 m 的环形下滑道、两个牵引反力座。结构转体前,撑脚底面和滑道之间设置 20 mm 间隙,同时为控制结构在整个过程中的启动、止动以及微调,可在下承台靠近撑脚位置设置一定数量的千斤顶反力座^[11]。

球铰一般由钢板轧制而成,分为上、下球形面板,上面板为凸面,通过上承台底部球冠状混凝土凸出部分与上部的牵引转盘连接;下面板为凹面,嵌固于下承台的混凝土凸台顶面,其构造如图 5 所示。

综合考虑施工过程中的各种不利因素(例如风荷载、施工误差等),经计算转体结构的设计最大总重量 $G=223\ 753.5$ kN,结合下部结构尺寸、操作空间等,钢球铰的平面直径按 5.0 m 设计,按照式(1)可求得球铰下承台混凝土的计算压应力 $\sigma=15.95$ MPa。

$$\sigma = 4 \times K \times G / (\pi \times D^2) \tag{1}$$

式中: σ 为球铰混凝土的压应力,kPa; K 为球铰偏压效应增大系数,取 1.4; G 为转体总重力,kN; D 为球铰

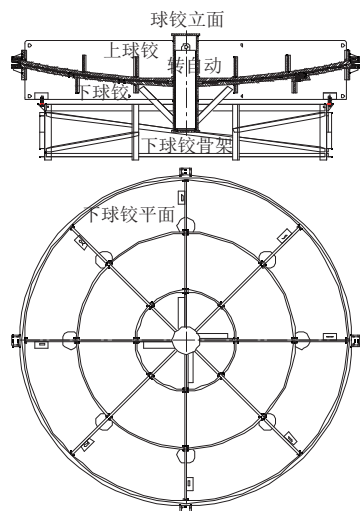


图5 球铰平、立面示意图

的平面直径, m。根据计算结果, 球铰上、下承台材料选用 C55 混凝土, 其最大容许压应力 $0.5 \times f_{ck} = 17.75 \text{ MPa} > \sigma = 15.95 \text{ MPa}$ 。

为减小球铰转动时的摩擦阻力, 在下球铰的顶面布置 1 400 块直径 60 mm、厚度 18 mm 的聚四氟乙烯滑片, 根据式(2)可算得滑片转体施工时在最不利组合(两侧主梁混凝土施工误差+纵向风力作用+横向风力作用+施工机具)作用下的应力 $\sigma_{\text{滑片}} = 79.14 \text{ MPa} > f_{yk} = 100 \text{ MPa}$, 聚四氟乙烯滑片的应力满足转体施工要求^[12-14]。

$$\sigma_{\text{滑片}} = K \times G / (n \times A) \quad (2)$$

式中: K 、 G 的含义与式(1)一致; n 为聚四氟乙烯滑片的块数; A 为一块圆形滑片的平面面积, m^2 。

为避免球铰钢板在加工、运输时产生变形, 同时增强球铰与混凝土之间的连接, 在球铰的两侧设置一定数量的加劲肋(肋条)。

2.2 牵引系统

牵引系统一般由牵引台座、牵引索、千斤顶反力座及张拉千斤顶和顶推千斤顶组成。牵引台座位于下承台 2 个对角位置上, 千斤顶反力座环线布置于滑道两侧; 每个转盘设置 2 束牵引索, 牵引索采用 15-21 ϕ_s 15.2 高强低松弛钢绞线, 牵引索圆顺缠绕于转盘表面, 千斤顶反力座配合钢横梁用于转台启动助力, 牵引系统布置见图 6。

根据计算, 本转体系统采用 2 组牵引系统, 每组牵引系统布置 2 台 ZLD300 型连续张拉千斤顶, 通过拽拉缠绕于上承台转盘上的 21- ϕ_s 15.2 钢绞线产生水平旋转力矩, 使得转动体系转动, 另有多台辅助千斤顶。在正常转动情况下, 偏载很小, 不考虑撑脚参与受力, 竖向力全部由球铰来承担。摩擦力启动时

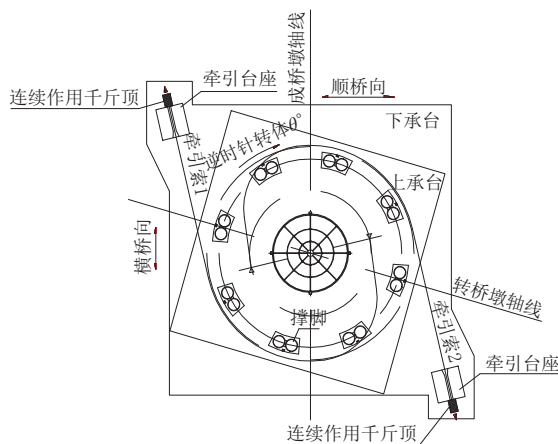


图6 牵引系统布置图

按静摩擦系数计算, 转动过程中按动摩擦系数计算, 计算中考虑静摩擦系数 $\mu_s = 0.1$, 动摩擦系数 $\mu_d = 0.06$ ^[15], 牵引索的安全系数取 2。

启动时的总摩擦力矩:

$$M_s = \mu_s \times G \times 2r / 3 = 37\,292.3 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

转动过程中的总摩擦力矩:

$$M_d = \mu_d \times G \times 2r / 3 = 2\,237.4 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (4)$$

启动时所需的牵引力:

$$T_s = M_s / D_{\text{转盘}} = 2\,742.1 \text{ kN} \quad (5)$$

转动过程中所需的牵引力:

$$T_d = M_d / D_{\text{转盘}} = 1\,645.3 \text{ kN} \quad (6)$$

式中: μ_s 、 μ_d 分别为静摩擦系数和动摩擦系数; r 为球铰的平面半径, m; $D_{\text{转盘}}$ 为转盘直径, m。

在 2 组牵引系统共同作用下, 牵引索的破断力为:

$$F_{\text{破}} = 2n \times f_{pk} \times S_{\text{钢绞线}} = 10\,936.8 \text{ kN} \quad (7)$$

式中: n 为每束钢绞线的股数; f_{pk} 为钢绞线的抗拉强度设计值, kPa; $S_{\text{钢绞线}}$ 为每股钢绞线的横截面积, m^2 。

启动时牵引索的安全系数: $\lambda = F_{\text{破}} / T_s = 3.99 > 2$, 满足牵引索的安全要求。牵引系统能提供的牵引力为 $6\,000 \text{ kN} > T_s = 2\,742.1 \text{ kN}$, 能保证转体结构的正常启动。

2.3 平衡系统

为确保结构在转体过程中的稳定, 避免发生较大的倾斜, 在上承台底面设置 8 组撑脚。撑脚采用直径 800 mm、壁厚 24 mm 的钢管制作, 钢管内灌满 C50 微膨胀混凝土, 8 组撑脚的中心位于直径 12 m 的圆周上并呈径向对称布置, 撑脚构造见图 7, 图 7 中 N1 表示撑脚钢管, N2 表示环向加劲板, N3 表示撑脚底板, N4、N5 表示竖向加劲板。

滑道位于撑脚的正下方, 其宽度为 1.1 m, 中心与撑脚的中心重合, 施工时为了保证上部结构的稳

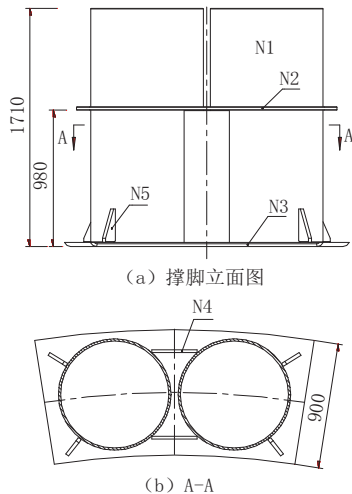


图7 撑脚构造示意图(单位:mm)

定,撑脚应能随着结构转动而在滑道内滑动,同时需确保整个滑道平面水平,任意两点的相对高差不大于2 mm。

球铰在竖直平面内转动产生的摩阻力矩:

$$M_z = \mu \times G \times R \quad (8)$$

式中: μ 为球铰转动时竖平面内的摩擦系数,取0.02; R 为球铰的球面半径,为11.0 m; G 的含义与式(1)一致,可得 $M_z = 49\,225.8\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

在横桥向、纵桥向风荷载和施工过程中的不平衡荷载等作用下,球铰处的总弯矩 $M_{\text{总}} = 15\,9291.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,考虑2对撑脚(4个)同时作用,2对撑脚连线至中心线半径 $R' = 5.494\text{ m}$,根据式(9)可算得单个撑脚承受的轴力 $N_{\text{撑脚}} = 5\,008.5\text{ kN}$ 。

$$N_{\text{撑脚}} = (M_{\text{总}} - M_z) / (4 \times R') \quad (9)$$

式中: $N_{\text{撑脚}}$ 为单个撑脚的轴力,kN; $M_{\text{总}}$ 为竖平面内的总不平衡弯矩,kN·m; M_z 为摩阻力在竖平面内的产生的力矩,kN·m; R' 为2对撑脚连线至中心线的半径,m。

根据钢管混凝土轴心抗压承载力,可得撑脚钢管混凝土的极限承载力为33 269 kN。

$$N_0 = 0.9A_c f_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta) \quad (10)$$

式中: θ 为钢管混凝土的套箍指标, $\theta = A_s f_s / A_c f_c = 1.28$; f_s 为钢管抗压强度设计值,kPa; A_s 为钢管的横截面面积,m²; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值,kPa; A_c 为核心混凝土的截面面积,m²。

当结构存在倾覆弯矩时,必然导致结构侧倾,撑脚受力。在倾覆弯矩作用下,可得结构的抗倾覆系数: $k = N_0 / N_{\text{撑脚}} = 6.64 \geq 1.5$,转体施工过程中,转体结构的抗倾覆稳定性满足要求。

3 结 语

本文对平面转体施工的承重系统、牵引系统和平衡系统3个控制技术进行了分析,结果表明:

(1)承重系统的受力满足要求,能够发挥基础性作用;

(2)牵引系统能够提供结构转动所需的牵引力,确保结构正常转动;

(3)平衡系统能够保证结构转动过程中的稳定性。

跨铁路桥采用平面转体施工方法,封锁铁路的要点时间仅需75 min,最大程度地减小对沿线铁路运营的影响。转体桥同时跨越的铁路线条数、转体施工的跨数以及转体结构的桥墩高度在国内都较少见,因此该桥的建设具有较高的经济效益和社会效益,也为同类型转体群桥梁建设提供了较大的技术参考价值。

参考文献:

- [1] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 张联燕,程懋方,谭邦明,等.桥梁转体施工[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2003.
- [3] 蒋红卫,郑晨.跨沪宁高速公路大吨位钢球铰转体施工工艺[J].世界桥梁,2011(5):15-18.
- [4] 殷晓波.上跨铁路(60+100+60)m连续梁墩顶转体施工结构设计研究[J].国防交通工程与技术,2018,16(3):34-37.
- [5] 赵佳云.张呼高速铁路连续梁桥墩顶水平转体施工技术[J].施工技术,2017,46(5):73-76.
- [6] 李辉,邹永伟,徐升桥,等.永临结合的墩顶转体法在铁路连续梁桥施工中的应用研究[J].铁道标准设计,2019(2):66-69.
- [7] 余海堂.转体施工连续刚构桥主墩群桩基础受力分析[J].中外公路,2016(6):130-133.
- [8] 张天雷.高墩大跨曲线桥梁墩底转体风险分析与控制[J].铁道建筑技术,2018(5):32-35.
- [9] 雷俊卿.桥梁转体施工新技术的研究[J].西安公路交通大学学报,1998(10):189-192.
- [10] 刘校明.连续刚构桥双幅T构同步转体施工技术[J].世界桥梁,2016,44(1):25-29.
- [11] 王东.海青铁路跨胶济客运专线(40+64+40)m连续梁转体施工设计[J].铁道标准设计,2014(5):81-85.
- [12] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [13] 左敏,江克斌.转体桥平转球铰转体过程应力计算方法研究[J].铁道标准设计,2015(12):36-39.
- [14] 王立中.转体施工的公路T型刚构桥梁转动结构设计[J].铁道工程学报,2006(12):41-43.
- [15] 颜惠华,王长海,罗力军.桥梁转体施工中球铰静摩擦系数计算方法[J].世界桥梁,2015,43(4):74-78.