

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2021.06.027

大跨径小半径曲线桥梁转体结构设计

陈爱荣

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要:以宁波市轨道交通 4 号线工程跨铁路桥为例,阐述了大跨径小半径曲线转体桥转体结构的设计要点和应对此类桥梁上部结构恒载横向偏心的处理方法。通过 Midas 软件建模,计算分析了转体结构悬浇阶段的抗倾覆稳定性随悬浇节段的变化规律,并对转体阶段的结构稳定性计算进行了探讨。

关键词:小半径曲线;平转法施工;抗倾覆稳定性

中图分类号: U443.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2021)06-0105-04

0 引 言

桥梁转体施工按旋转方向可分为平转法、竖转法以及平竖转相结合的工法^[1]。一般平转法桥梁平面线形通常为直线或大半径曲线。近年来,逐步出现了小半径曲线桥梁的转体施工,相比之下,小半径曲线桥梁的转体结构设计更复杂。对于跨径较大的桥梁,转体结构的稳定性往往成为设计关注的重点。本文以宁波市轨道交通 4 号线跨铁路转体桥为例,介绍大跨径小半径曲线悬浇桥梁转体结构的设计要点。

1 工程概况

宁波市轨道交通 4 号线在右转出江北大道后,小角度(约 30°)斜交上跨萧甬铁路、杭甬客专,线路曲线半径仅 350 m。

跨铁路节点桥现状桥位见图 1。

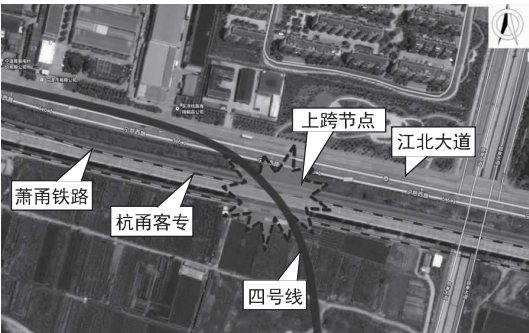


图 1 跨铁路节点桥现状桥位

萧甬铁路交叉段为路基段,采用混凝土轨枕,有碴轨道;杭甬客专为高速铁路,设计时速 350 km/h,

交叉段为高架桥,总宽约 12 m。为了减小本工程对既有线路的影响,桥梁方案采用跨径布置为 68 m+138 m+95 m=301 m 的预应力混凝土刚构桥,主跨 1 孔跨越现状铁路,北侧承台边缘(墩号 QJ01D027)距萧甬铁路中心线 9.1 m,南侧承台边缘(墩号 QJ01D028)距杭甬客专中心线 20.9 m,满足铁路保护施工安全距离要求。先在铁路两侧浇筑桥墩及主梁,浇筑完毕后,进行转体施工,转体就位后合龙成桥。

跨铁路节点桥平面布置如图 2 所示。

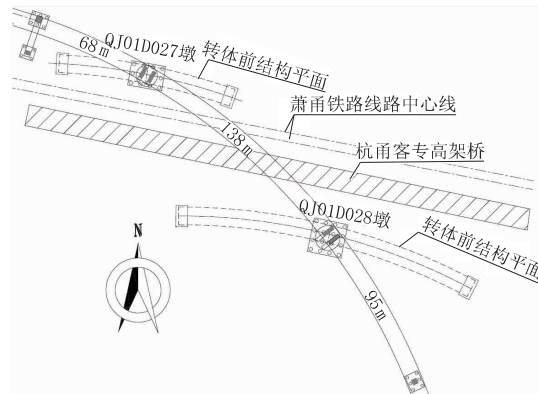


图 2 跨铁路节点桥平面布置图

2 主要技术标准

- (1)最高运行速度 $v=80$ km/h。
- (2)车辆:B 型车,6 辆编组,轴重不大于 14 t。
- (3)线路:双线,线间距为 4.2 m。
- (4)桥梁宽度:11 m。
- (5)设计使用年限:100 a。

3 转体结构设计

3.1 总体设计

转体结构由上转盘、球铰、下承台、转体牵引系统

收稿日期:2020-12-24

作者简介:陈爱荣(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

组成^[2]。在转体过程中,上转盘、下承台通过球铰传力,呈现多维受力状态,均需布置双向多层预应力钢束。

QJ01D27墩转体质量约7 700 t,T构总长100 m,转体角度19°,上转盘平面为 $\phi 12$ m圆形,厚2.5 m,下承台平面为14 m $\times$ 19.4 m矩形,厚3.5 m,下设12根直径2.0 m钻孔灌注桩基础;QJ01D28墩转体质量约14 600 t,T构总长172 m,转体角度40°,上转盘平面为 $\phi 15$ m圆形,厚3.0 m,下承台平面为19.4 m $\times$ 19.4 m矩形,厚4.0 m,下设16根直径2.0 m钻孔灌注桩基础。上转盘、下承台间布置撑脚及砂箱,转体完成后浇筑厚0.8 m的封铰混凝土。

转体牵引系统由中心对称的2束钢绞线组成,钢束锚固于上转盘内部,如图3所示。QJ01D027墩转体启动牵引力739 kN,选用11- $\phi 15.2$ 钢绞线,启动时钢绞线应力480 MPa,安全系数为3.8;QJ01D028墩转体启动牵引力1 511 kN,选用21- $\phi 15.2$ 钢绞线,启动时钢绞线应力514 MPa,安全系数为3.6。

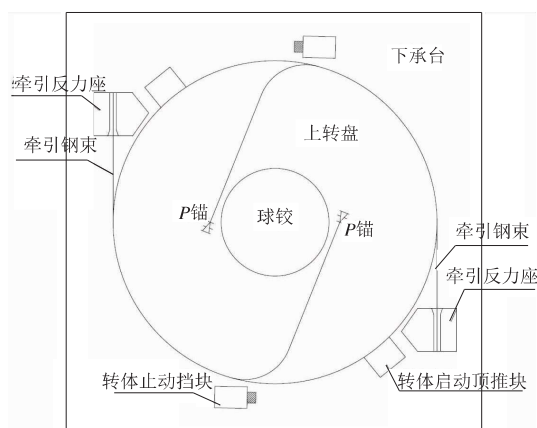


图3 转体牵引系统示意图

3.2 球铰的选用

球铰一般采用厂家成套产品,可以根据转体吨位确定球铰的材料及尺寸。

球铰材料有钢材及混凝土2种,混凝土球铰一般适用于转体吨位6 500 t以下的桥梁,本桥转体吨位较大,故选用钢球铰。

根据转体吨位,可按表1选用球铰的磨心支承半径 R_1 ,再按表2选用球铰的半径 R 。

本桥转体墩位分别为7 700 t和14 600 t,故相应的球铰磨心支承半径 R_1 和球铰半径 R 分别选用1.5 m、7 m和2 m、8 m,设计过程中实体建模分析,保证球铰在转体时全程受压且不被压坏。

3.3 转盘中心预偏设置

曲线桥上部结构自重会引起横向不平衡弯矩。

表1 不同转体质量下的球铰支承半径取值范围

转体吨位 / 万 t	支承半径 / m	转体吨位 / 万 t	支承半径 / m
0.2~0.4	0.8~1.2	1.2~1.4	1.7~2.2
0.4~0.6	1.0~1.4	1.4~1.7	1.8~2.4
0.6~0.8	1.2~1.6	1.7~2.0	2.0~2.6
0.8~1.0	1.4~1.8	2.0~2.4	2.2~2.8
1.0~1.2	1.5~2.0	2.4~2.8	2.4~3.0

表2 不同支承半径的球铰半径取值范围

支承半径 / m	球铰半径 / m
1.0~1.2	4.0~6.0
1.2~1.4	5.0~6.8
1.4~1.6	6.0~7.6
1.6~1.8	6.8~8.5
1.8~2.0	7.6~9.4

本桥位于小半径曲线上,最大悬臂状态下墩底横向偏心弯矩QJ01D027墩为50 085 kN, QJ01D028墩为251 410 kN,偏心弯矩过大。配重平台因配重量小,力臂较短而平衡偏心弯矩能力有限,故需通过设置转盘中心预偏以抵消曲线梁上部结构恒载横向偏心。横向预偏值可通过墩底横向不平衡弯矩除以转体质量求得,方向与横向不平衡弯矩引起的偏心方向相同。

通过计算,本桥QJ01D027墩转盘中心设置0.8 m横向预偏心, QJ01D028墩转盘中心设置2.5 m横向预偏心,桥墩采用矩形空心截面,横向立剖面单侧变宽以调整偏心,如图4所示。

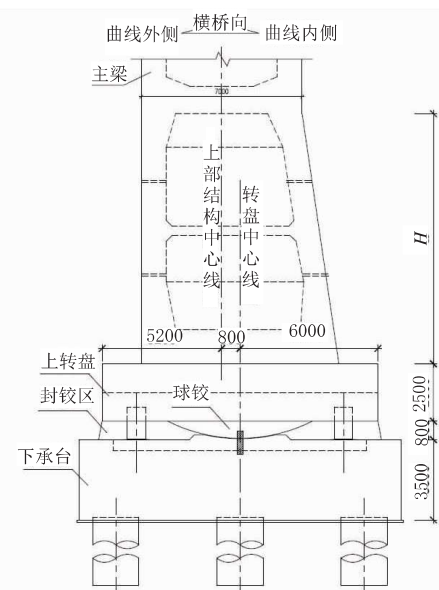


图4 转盘中心预偏设置示意图(以QJ01D027墩为例)
(单位:mm)

3.4 悬浇阶段稳定性分析

转盘中心横向预偏为基于T构施工至最大悬臂

状态时设置,对于施工至各节段的悬臂状态则会存在与偏心设置方向反向的弯矩;考虑悬臂浇筑施工的先后顺序、风荷载的方向、施工机具的布置等因素也会造成荷载的不对称,故需对悬浇各节段的抗倾覆稳定性进行验算。

3.4.1 计算模型

采用计算软件 Midas/Civil 建立悬浇阶段曲线杆系模型,进行悬臂浇筑施工模拟。下部结构建至上转盘为止,在球铰位置处施加固结边界条件,计算模型如图 5 所示。



图 5 悬臂浇筑阶段模型(以 QJ01D027 墩为例)

3.4.2 计算荷载

计算荷载主要考虑引起悬浇阶段转体结构倾覆风险的荷载。

自重:混凝土容重按 26 kN/m^3 计算,软件自动计算。

风荷载:分别考虑 9 级风(25 m/s)与百年一遇风(31.3 m/s)在施工过程中引起的横向风荷载、纵向风荷载以及风举力。风举力 $P=C_L w A$, 式中: w 为基本风压; A 为水平投影面积; C_L 为风举力系数,取 $0.75^{[3]}$ 。

挂篮荷载:取悬臂施工最大节段质量的 40% 计算,作用点位于下一节段中间位置。

施工误差荷载:考虑施工节段时产生 $\pm 2.5\%$ 的质量误差。

3.4.3 工况组合

假定转体结构纵桥向重心线两侧分别为 A、B 侧,横桥向重心线两侧分别为 C、D 侧,如图 6 所示。

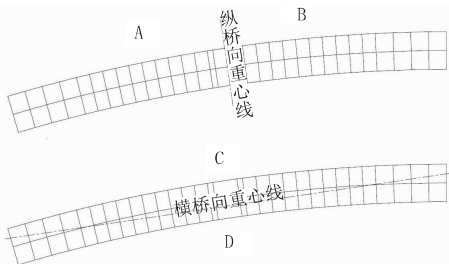


图 6 转体结构重心线划分

验算悬臂浇筑阶段抗倾覆稳定性时考虑如下 4 种荷载工况:

(1)A 侧恒载重 102.5%+B 侧恒载重 97.5%+ 对

称挂篮+A 侧箱梁多浇筑 1/2 节段+A 侧有 50 kN 施工机具+顺桥向 9 级风载+B 侧风举力。

(2)A 侧恒载重 102.5%+B 侧恒载重 97.5%+ 对称挂篮+顺桥向百年一遇风载+B 侧风举力。

(3)C 侧恒载重 102.5%+D 侧恒载重 97.5%+ 对称挂篮+A 侧箱梁多浇筑 1/2 节段+A 侧有 50 kN 施工机具+横桥向 9 级风载。

(4)C 侧恒载重 102.5%+D 侧恒载重 97.5%+ 对称挂篮+横桥向百年一遇风载。

工况(1)、工况(2)为纵桥向重心线单侧最不利布置工况;工况(3)、工况(4)为横桥向重心线单侧最不利布置工况。

3.4.4 结果分析

转体结构抗倾覆失稳力矩为 $T=R' \times F$, 其中: R' 为球铰体系的环道半径; F 为转体结构球铰以上部分的总重。提取 4 种工况下施工每个节段时球铰底部的轴力 F 以及 2 个方向的弯矩 M_x 、 M_y , 计算合弯矩 $M=(M_x^2 + M_y^2)^{0.5}$, 即可求得抗倾覆稳定系数 $k=T/M=R' \times F/M$, 如图 7 所示。

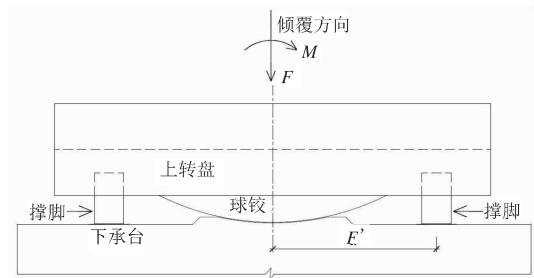


图 7 悬浇阶段抗倾覆失稳图示

QJ01D27、QJ01D28 墩在 4 种荷载工况下施工每个节段时抗倾覆稳定系数的变化规律如图 8、图 9 所示。

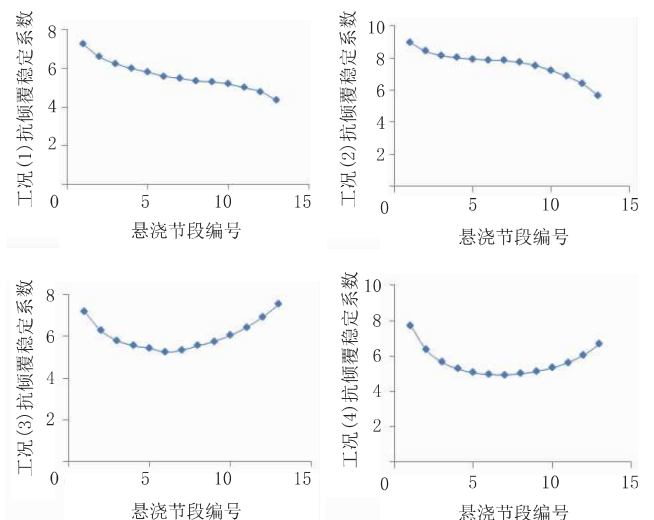


图 8 QJ01D27 墩各工况下抗倾覆稳定系数变化图

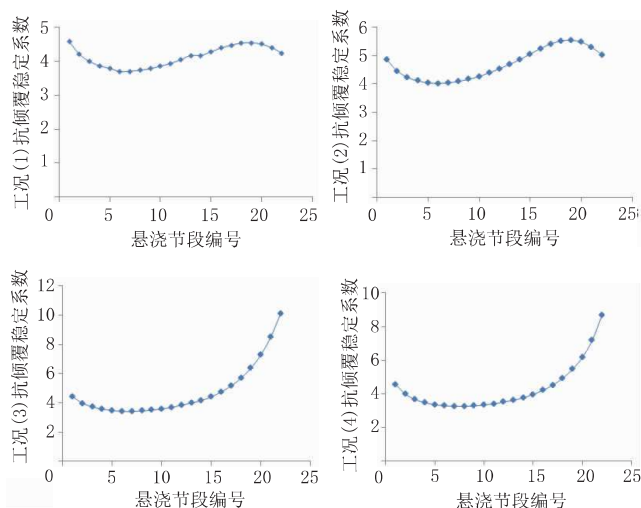


图9 QJ01D28墩各工况下抗倾覆稳定系数变化图

由图8、图9可知,本桥4种最不利工况下,悬浇阶段结构的抗倾覆稳定性均能满足规范要求。分析抗倾覆稳定系数随悬浇节段的变化规律发现,纵向不平衡荷载作用下(工况(1)、工况(2)),抗倾覆稳定系数整体呈现正弦曲线变化规律,最小值在1/4跨或全跨附近;横向不平衡荷载作用下(工况(3)、工况(4)),抗倾覆稳定系数呈现近似抛物线变化规律,先减小再增大,最小值在1/4跨或半跨附近。对于悬浇阶段结构的抗倾覆稳定性验算,本文推荐选取悬浇至1/4跨、半跨以及全跨时的受力状态进行计算分析。

3.5 转体阶段稳定性分析

转体结构除了要满足悬浇阶段的抗倾覆稳定性要求,还需满足转体阶段的抗倾覆稳定性要求。转体过程中,球铰发生如图7所示的倾覆失稳模式,以撑脚为轴发生倾覆失稳。

倾覆荷载考虑9级风(25 m/s)在施工过程中引起的横向风荷载、纵向风荷载以及风举力,上部恒载剩余偏心按配重调偏后0.2 m计,并考虑撑脚下移10 mm引起的重心附加偏移。撑脚与环道的几何相对位置如图10所示^[4]。

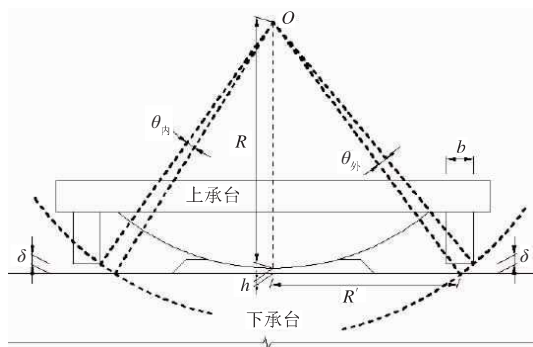


图10 撑脚与环道的几何相对位置关系

图10中参数间有如下关系:

$$\sin \frac{\theta_{\text{外}}}{2} \sqrt{(R'+b/2-\sqrt{R_{\text{外}}^2-(R+h)^2})^2+\delta^2} / 2R_{\text{外}} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{外}}$ 为撑脚外边缘的旋转半径,其表达式为:

$$R_{\text{外}} = \sqrt{(R+h-\delta)^2+(R'+b/2)^2} \quad (2)$$

转体结构的重心位置偏不利地取于梁顶,通过撑脚下移值10 mm计算得到球铰发生的转角 $\theta_{\text{外}}$,可得重心附加偏移值:

$$\Delta = (h_{\text{梁高}} + h_{\text{墩高}} + h_{\text{上转盘厚}} + h_{\text{转体厚}} - R - h) \sin \theta_{\text{外}} \quad (3)$$

分别计算转体阶段横向和纵向的抗倾覆稳定系数。横向风荷载及相应风举力引起的倾覆弯矩为 $M_{\text{横}}$,纵向风荷载及相应风举力引起的倾覆弯矩为 $M_{\text{纵}}$,则转体阶段的横向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{横}}$ 、纵向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{纵}}$ 分别为:

$$k_{\text{横}} = T/M_{\text{横}} = (R'-0.2-\Delta) \times F/M_{\text{横}} \quad (4)$$

$$k_{\text{纵}} = T/M_{\text{纵}} = (R'-0.2-\Delta) \times F/M_{\text{纵}} \quad (5)$$

本桥转体阶段QJ01D27墩横向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{横}}$ 为32.7,纵向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{纵}}$ 为56.3;QJ01D28墩横向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{横}}$ 为42.7,纵向抗倾覆稳定系数 $k_{\text{纵}}$ 为75.0,均能够满足抗倾覆稳定要求,且富余很大。分析结果不难发现,设置转盘预偏及配重调偏后的转体结构,不平衡弯矩已大大降低,只需施工精度控制得当,一般不会发生转体阶段的倾覆失稳。

4 结 语

本文基于宁波市轨道交通4号线工程跨铁路转体桥,从转体结构的总体组成、球铰的选用、转盘预偏心的设置、悬浇阶段结构的稳定性、转体阶段结构的稳定性等方面阐述了大跨径小半径曲线转体桥转体结构的设计要点、计算方法等,总结了此类桥梁悬浇阶段结构的抗倾覆稳定性规律,提出悬浇阶段结构的抗倾覆稳定性验算关键节点为施工1/4跨节段、半跨节段以及最终节段;转体阶段结构的抗倾覆稳定性系数一般富余较大,不会发生转体阶段的倾覆失稳。所得结论可为同类工程项目提供参考。

参考文献:

- [1] 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,2001.
- [2] 延力强.小曲线半径T形刚构转体设计[J].铁道勘察,2014(1):79-84.
- [3] BS5400: Specification for Loads[S]. London: British Standards Institution, 1978.
- [4] 张琪峰.大吨位平转施工拱桥的转体系统构造设计与施工技术研究[D].南京:东南大学,2012.