

复杂边界条件下的轨道交通连续梁桥设计

王伦文¹, 赵胤儒¹, 王卫²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉地铁股份有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 涉铁、涉限空桥梁由于安全风险突出、对既有交通运行的影响大, 其项目审批和设计难度远高于常规桥梁。以武汉市轨道交通7号线北延线上跨京广上货线铁路处特大桥为背景, 分析同时涉铁和涉限空等复杂边界条件下的大跨度轨道交通高架桥的控制因素, 开展桥型方案比选工作; 对推荐方案的转体承台关键指标进行验算, 确定承台配筋与截面高度; 利用有限元软件分析不同工况下转体承台桩基的受力状态, 发现其异于刚性承台的受力特征; 根据力学公式推导研究大跨度连续梁桥的工后徐变控制措施, 有效控制了工后徐变。推荐桥型方案最终顺利获批, 且在转体施工过程中转体结构的各项指标均正常, 完工后的主梁徐变变形与计算值基本吻合, 可以为类似工程提供借鉴经验。

关键词: 轨道交通; 复杂边界条件; 大跨度桥梁; 转体结构; 工后徐变

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0082-05

Design of Continuous Beam Bridges for Rail Transit under Complex Boundary Conditions

WANG Lunwen¹, ZHAO Yinru¹, WANG Wei²

(1. Changjiang Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Wuhan Metro Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: Due to the prominent safety risks and significant impact on the existing traffic operations, the approval and design difficulty of bridges involving railway and aviation clearance is much higher than that of conventional bridges. Taking the super-large bridge at the north extension of Wuhan Metro Line 7 spanning the freight line of Beijing - Guangzhou Railway as the background, the control factors of long-span rail transit viaducts under the complex boundary conditions involving railway and aviation clearance at the same time are analyzed, and the schemes of bridge type are compared and selected. The key indicators of the rotatory base slab in the recommended scheme are checked and calculated to determine the reinforcement and section height of base slab. The finite element software is used to analyze the stress state of the pile foundation of rotatory base slab under different working conditions. It is found that its stress characteristics are different from those of the rigid base slab. Based on the derivation of mechanical formulas, the post-construction creep control measures for long-span continuous beam bridges are studied to effectively control the post-construction creep. The recommended bridge type scheme of this bridge has been successfully approved, and all indicators of the rotatory structure are normal in the rotating construction process. The creep deformation of the main girder after completion is basically consistent with the calculated values, which provides the reference experience for similar projects.

Keywords: rail transit; complex boundary conditions; long-span bridges; rotatory structure; post-construction creep

0 引言

随着城市的不断发展, 轨道交通越来越向城市外围延伸, 市郊轨道交通高架桥项目占比逐渐增加。由于交通路网的日益密集, 轨道交通高架桥线路交

叉口的设计也日趋复杂。对于复杂边界条件(同时涉铁、涉限空等)下的轨道交通高架桥, 如何尽可能减少新建项目对既有控制因素的影响成为桥梁设计方案考虑的重点, 也是方案能否通过相关部门审批的关键^[1]。

公路和城市道路上跨既有铁路已有较多的工程案例和研究, 如史娣^[2]介绍了武汉市二环线主桥采用(30+138+252+80) m 高低塔钢箱梁斜拉桥上跨铁路的方案; 刘润舟^[3]介绍了共安大桥采用(70+125+

收稿日期: 2024-08-10

基金项目: 长江设计集团有限公司科研项目(CX2022Z26-1)

作者简介: 王伦文(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

70) m 转体连续梁桥上跨昌九城际和京九铁路的方案;井江永^[4]介绍了(50+85+50) m 跨铁路连续梁不对称转体设计方案;赵晓梅^[5]介绍了上海市漕宝路快速路上跨多线铁路走廊的桥型方案。然而,针对城市轨道高架桥特别是同时涉铁和涉限空的大跨度桥的研究较少。本文以武汉市轨道交通7号线北延线余横区间上跨京广上货线处特大桥为背景,研究复杂边界条件下的桥梁设计方案,供类似工程参考。

1 工程概况

武汉市轨道交通7号线北延线(前川线)工程属于7号线的北延部分,自黄陂前川至金银湖,沿线串联了前川城区、轨道交通产业基地、横店、临空经济区、盘龙城及金银湖片区,是衔接北部新城组团与武汉中心城区的一条重要的客运交通走廊。线路起点设在黄陂广场,主要沿黄陂大道、双凤大道、川龙大道、盘龙大道、环湖中路等主干道南北走向,终点与7号线一期工程相接,线路走向为南北走向。全线长36.45 km,共设有11座车站,其中,高架车站5座。

余彭湾站至横店站区间为高架区间,区间内上跨京广上行货车线等5股既有铁路的特大桥为全线的控制性工程,全桥总长708.9 m。主桥长度不小于480 m,结构类型为双线无砟轨道大跨度桥梁,需采用转体施工工艺,引桥采用标准跨预应力混凝土简支箱梁。桥梁的下部结构选用独柱式桥墩,基础选用钻孔灌注桩基础。

该特大桥位于武汉市黄陂区的西南方向,距离天河机场的直线距离约8.4 km。经查询《武汉天河机场航行服务程序净空保护区域一体化图使用管理办法》^[6],桥位处的航空限界高度仅为90 m。主桥上跨京广上、下行货运线和麻武上、下行联络线及武汉北上行环发线共5股既有铁路,此外还有3股预留规划铁路。既有铁路为普通货运铁路,线路运输车辆较繁忙,铁路结构为路基形式。

2 复杂边界条件下的桥型方案选择

2.1 主要控制因素分析

该桥所处的边界条件非常复杂,除位于航空限高范围内和上跨多股既有营运铁路外,项目周边还存在军事用地,为避让军事用地无法调整线路走向,需要在维持线路不变的条件下开展桥型方案研究工作。桥位处5股既有铁路中有4股铁路位于北边,且

相邻铁路距离较近,剩余1股铁路武汉北上行环发线位于南边、距其他铁路较远,中间区域形成了孤岛,如图1所示。根据桥位处的地形地貌条件,当桥梁跨径严格满足《铁路安全管理条例》^[7]中规定的基础边缘至铁路路堑边坡开口线的安全距离时,主桥主跨不小于250 m;当在铁路中间孤岛区域设置桥墩时,主桥主跨不小于150 m。根据《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》^[8]中的规定,上跨铁路桥梁应优先选用转体施工工艺。基于上述控制因素分析,可以预见复杂边界下的轨道交通桥梁确定桥型方案的原则较常规大跨度桥梁具有显著的区别。根据工程建设条件及相关经验,该桥可供选择的桥型方案主要包含预应力混凝土连续梁桥、矮塔斜拉桥和连续钢桁梁等方案。

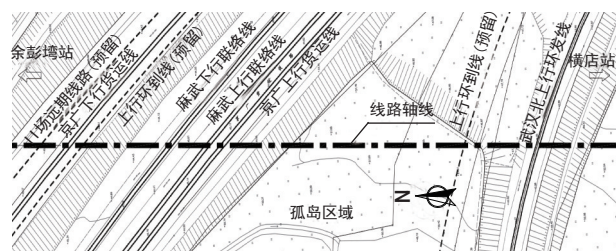


图1 轨道交通7号线线路平面示意图

2.2 预应力混凝土连续梁桥方案

当主桥采用预应力混凝土连续梁桥方案时,无法用一跨跨越铁路,需要在铁路中间孤岛区域设置桥墩,设计跨径组成为(86+2×156+86) m 预应力混凝土连续梁桥。主桥最大跨径达156 m,已接近轨道交通连续梁桥的极限跨径,需要采用技术措施控制主梁跨中的挠度和工后徐变。主桥采用先大节段支架现浇后转体合龙的施工工艺。由于地形限制,桥梁转体主墩基础至铁路路堑边坡开口线的距离均无法满足《铁路安全管理条例》的规定。该桥型方案基本满足航空限界要求,工程造价较低,管养难度小,但难以通过铁路管理部门的审批要求,需要仔细研究铁路临边防护措施,设计难度大。

2.3 矮塔斜拉桥方案

当主桥采用矮塔斜拉桥方案时,可采用一跨跨越5股既有铁路,设计跨径组成为(30+145+250+145+30) m 的预应力混凝土矮塔斜拉桥,主桥采用先悬臂浇筑后转体合龙的施工工艺。依据线路资料,铁路上方桥梁的纵断面高程距离90 m 高航空限界的高度不足18 m,当采用极限高度时,桥面以上塔高与主跨跨径之比为0.072,小于《公路斜拉桥设计规范》^[9]规

定的最小值0.1,拉索与桥面的夹角偏小,拉索提供的竖向支撑力小,拉索强度利用效率低,易造成材料浪费,且跨中挠度较大。该桥型方案基本满足铁路管理部门对于涉铁桥梁的审批要求,管养难度一般,但难以满足航空限界要求,设计难度较大,工程造价偏高。

2.4 钢桁梁方案

当主桥采用连续钢桁梁方案时,无法一跨跨越铁路,需要在铁路中间孤岛区域设置桥墩,设计跨径组成为(86+2×176+86) m钢桁梁桥。主桥采用先节段拼装后转体合龙的施工工艺。该方案可以满足《铁路安全管理条例》和航空限界的要求,但是钢结构耐久性较差,需要定期管养。按照现行规范要求,最长防腐体系的年限为25 a,桥梁设计使用年限为100 a,桥梁在运营期内需要多次在铁路上方开展检修工作,这对铁路运营的影响较大,导致本方案的审批难度较大。

2.5 方案比选

综合考虑航空限界、对既有铁路的影响、运维管养难度及工程造价等控制因素,如表1所列,该特大桥主桥最终选择了满足航空限界且运维管养难度小的(86+2×156+86) m预应力混凝土连续梁桥方案,如图2所示。推荐方案采用先大节段支架现浇后转体合龙的施工工艺,针对不满足铁路安全距离的问题,选用隔离桩措施进行防护。当前本推荐方案已顺利通过铁路主管部门的审批。

表1 桥型方案比选表

桥型方案	是否满足航空限界	是否一跨跨越铁路	运维管养难度	工程造价	是否推荐
混凝土连续梁方案	满足	否	小	低	是
斜拉桥方案	不满足	是	一般	高	否
钢桁梁方案	满足	否	大	高	否

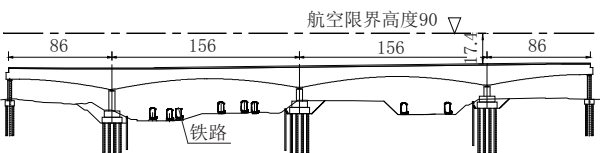


图2 推荐方案桥型布置图(单位:m)

3 大跨度桥梁转体结构设计

3.1 转体结构介绍

桥梁转体施工是指将桥梁结构不在线路轴线上完成施工,然后借助转体结构旋转就位的施工方法。根据桥梁转动方向分类,转体施工大致可分为3类:

竖转法、平转法以及平竖转结合法。平转法在3种方法中应用最广泛。转体结构主要包含下转盘、上转盘、球铰、滑道、牵引系统、辅助支撑系统等构件。桥梁转体施工的工作原理是利用千斤顶对拉牵引索,形成旋转力偶,从而带动上转盘以球铰为中心进行转动,直至桥梁上部结构旋转至设计位置。桥梁转体结构施工具有安全可靠、适用性强、施工周期短、经济节约、空间利用高等特点,常用于上跨铁路、高速公路、调水渠道等不能原位施工的情况。

本特大桥共设有3个水平转体主墩,转体吨位为15 000 t,位于国内轨道连续梁桥转体吨位前列。转体T构的长度为2×77 m,转体角度取桥梁轴线与既有铁路线的夹角。转体承台上转盘尺寸13 m(长)×13 m(宽)×3.5 m(高),下转盘尺寸16.5 m(长)×16.5 m(宽)×3.5 m(高),承台采用C50混凝土,如图3所示。承台下转盘作为转体结构的重要支撑构件,主要由混凝土承台、下球铰、撑脚及其环形滑道、转体牵引系统及反力座、轴线微调系统等部件组成。上转盘设有8个双圆柱钢管撑脚,钢管尺寸为 $\phi 800\text{ mm}\times 24\text{ mm}$,撑脚内灌注C50微膨胀混凝土,上转盘在整个转动过程中以受压状态为主。球铰由上球铰、下球铰、四氟乙烯板、定位钢销和预埋型钢钢骨架组成,球面半径为8.0 m,球体水平投影直径为3.9 m。承台底部设置16根直径1.8 m的钻孔灌注桩基础。相比于普通承台,转体结构的承台不仅构造复杂,而且对施工工艺要求更高。由于转体球铰的预埋件较多,下转盘混凝土分四次浇筑,受施工流程的影响,上转盘混凝土分两次浇筑。为保证转体后的主梁节段精准衔接,球铰安装精度达 $\pm 1\text{ mm}$ 。

3.2 转体承台强度验算

根据转体结构的受力特征,承台在转体施工阶段的受力最为不利。桥梁转体时,转体T构需要解除上、下转盘之间的临时约束,此时上、下球铰之间为点支撑受力状态,转体T构含上转盘的重量完全支撑于直径为3.9 m的球铰上,承台的抗冲切强度和抗弯强度是结构验算的关键指标。按照承台高度与最外排桩中心距桥墩边缘的距离的大小关系进行分类,主墩承台在施工工况及成桥状态纵向截面计算时按“梁式体系”计算,而成桥状态下,承台横向截面按“撑杆-系杆体系”计算^[10]。由于T构转体前需要称重和配重,由结构自重引起的偏心力矩可以忽略,验算承台强度时主要考虑结构自重、风荷载和施工荷载。根据抗弯强度的验算结果,承台底部纵横均向

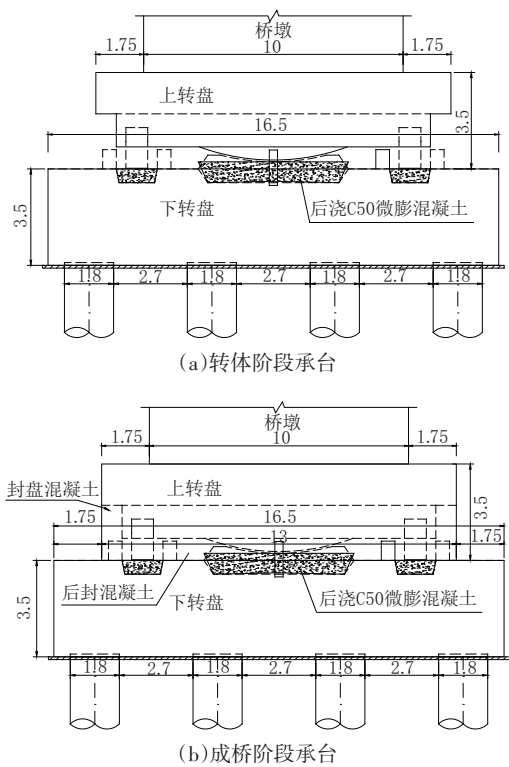


图3 转体承台立面布置图(单位:m)

配置4排 $\phi 32$ 的HRB400钢筋,钢筋间距为100mm。此外,承台纵横向均配置32根 $17\phi^{*}15.2$ 预应力钢束,作为强度储备。承台抗冲切验算时以球铰向下冲切工况最为不利,在混凝土等级不改变的情况下,承台抗冲切强度主要由承台高度决定,根据下表抗冲切强度验算结果,如表2所列,下转盘高度取3.5m时(考虑下球铰高出下转盘顶面0.5m,实际截面高度为4.0m)具有足够的富余强度,当减小下转盘高度时,抗冲切强度衰减明显。

3.3 转体承台桩基受力分析

转体承台的桩基在施工阶段和成桥阶段的受力状态存在显著差异。由于承台截面刚度远大于桩基截面刚度,承台通常假定为刚性板^[11],在考虑弯矩作用时计算得到的桩基内力分布状态为中桩小、边桩大、角桩最大。为研究转体承台在转体阶段下的受力状态,利用大型通用有限元分析软件MIDAS Civil进行建模计算,承台按三维实体单元模拟,桩基按杆系单元模拟,桩基水平约束用土弹簧模拟,如图4所示。据计算结果显示,在不考虑弯矩的情况下转体阶段桩基轴力分布状态为中桩最大、边桩次之、角桩

最小,中桩轴力约为角桩的2倍,与刚性承台理论的计算结果差异较大,如表3所列。而在成桥状态时,桩基轴力的分布较均匀,更接近刚性承台的假定。因此,当承台尺寸(16.5m)显著大于球铰直径(3.9m)时,刚性承台的假定条件不再完全适用,确定桩基长度时应考虑这种效应,避免出现桩基承载力不足的问题。

表3 不同工况下的桩基轴力对比表

验算工况	中桩轴力/ kN	边桩轴力/ kN	角桩轴力/ kN	中桩与角桩轴 力比值
转体阶段	13 581.9	9 055.4	6 327.8	2.15
成桥阶段	10 610.4	9 814.5	9 184.2	1.16

4 大跨度桥梁工后徐变控制技术

在荷载不变的情况下,混凝土的应变随时间增长而增大的现象称为“徐变”,徐变是混凝土的固有特性。大跨度混凝土梁由于预应力的长期作用,由徐变作用产生的结构变形较为明显。当桥面铺轨后,轨道下方混凝土梁体产生的微小徐变变形均会引起轨道的变形,从而对列车的运行安全造成影响。根据铁路^[12]和地铁^[13]设计规范规定,大跨度预应力连续梁的工后徐变不超过跨度的1/50,且不超过20mm。本特大桥采用(86+2×156+86)m预应力混凝土连续梁桥,主跨跨径位于国内轨道交通连续梁前列,徐变变形问题突出。因此,控制工后徐变变形是本特大桥亟需解决的难题。

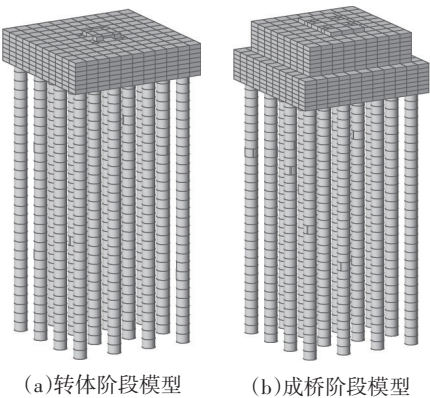


图4 转体承台有限元分析模型

根据工后徐变的形成原理,主要有两种减小工后徐变的措施:一是延长桥面铺轨时间,使得剩余的徐变变形在允许范围内;二是通过调整截面应力状

表2 承台抗冲切验算表

冲切力 F/kN	下转盘高度 h/m	截面有效高度 h_0/m	冲切截面周长 U_m/m	冲切应力 τ/kPa	抗冲切强度 $[\tau]/\text{kPa}$	是否满足
94 559	3.5	3.8	30.8	807.9	930	是
94 559	3	3.3	28.8	994.9	930	否

态,降低徐变变形。受项目工期影响,延长桥面铺轨的时间较为有限,因此调整截面应力状态往往更为奏效。结合材料力学知识,等截面箱梁的挠度可以用下式(1)进行表达:

$$f = \frac{\alpha \cdot \varphi \cdot M \cdot l^2}{EI} \quad (1)$$

式中: f 为徐变变形,mm; α 为载荷系数; φ 为徐变系数; M 表示箱梁跨中弯矩,N·mm; l 为箱梁跨度,mm; EI 为箱梁截面刚度,N·mm²。

其中, M 可由式(2)求得。

$$M = \Delta\sigma \cdot I/h \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为箱梁截面顶、底缘的应力差值,MPa; h 为截面高度,mm; I 为截面惯性矩,mm⁴;对于指定的箱梁截面尺寸,参数 h 和 I 通常为不变值。

$$\text{整合得到公式}^{[13]}: f = \frac{\alpha \cdot \Delta\sigma \cdot \varphi \cdot l^2}{E \cdot h} \quad (3)$$

由式(3)可知,当不改变参数 φ 、 h 和 l 时,通过减小箱梁截面应力差值 $\Delta\sigma$,能有效减小混凝土箱梁的徐变挠度。

通过调整预应力钢束布置可以减小截面的应力差,从而减小预应力混凝土梁的工后徐变。当把混凝土梁截面的上下缘应力差控制在4 MPa^[15]以内且铺轨时间按60 d控制时,本特大桥的工后徐变仅为15.2 mm,小于规范要求的容许值20 mm。桥梁完工后的徐变变形与理论计算值基本吻合。

5 结 语

武汉市轨道交通7号线北延线工程余彭湾站至横店站区间内上跨京广上行货车线处特大桥的推荐桥型方案顺利获批,且转体施工过程中转体结构的各项指标正常,完工后主梁的徐变变形与计算值基本吻合。本文对该桥的设计方案进行了总结,得到以下3点结论。

(1)对于同时存在涉铁和涉限空等复杂边界条件下的轨道交通桥梁,建议优先满足航空限界要求,

当铁路安全距离不满足要求时,可采用一定的工程措施进行补救。

(2)承台下转盘作为水平转体结构的核心受力构件,设计时需要充分考虑施工步骤的变化引起结构受力状态的改变,进行最不利工况下的强度验算,确保承台的抗冲切强度具有足够的富余度,应考虑承台“非完全刚性”的影响,避免出现桩基承载力不足的问题。

(3)减小大跨度预应力混凝土梁桥工后徐变变形的措施主要有两种:延长桥面铺轨时间和改变截面应力状态。当桥面铺轨可延长的时间有限时,通过进一步调整截面上下缘的应力差,可有效控制大跨度预应力混凝土梁的工后徐变。

参考文献:

- [1] 吴亮,王论文,赵胤儒.城市轨道交通上跨铁路特大桥方案研究[J].城市道桥与防洪,2021(12):41-44;74.
- [2] 史梯.武汉二环线上跨铁路立交桥总体设计[J].世界桥梁,2015,43(1):7-10;47.
- [3] 刘润舟.(70+125+70)m跨铁路转体连续梁桥设计[J].铁道标准设计,2013(12):67-70.
- [4] 井江永.(50+85+50)m跨铁路连续梁不对称转体设计研究[J].铁道标准设计,2018,62(9):67-71.
- [5] 赵晓梅,马磊,陈振东,等.大型立交跨多线铁路走廊的桥梁总体方案设计[J].现代交通技术,2023,20(3):34-40.
- [6] 武汉市人民政府.市人民政府关于印发武汉天河机场航行服务程序净空保护区区域一体化图使用管理办法的通知[R].武汉:武汉市人民政府公报,2019.
- [7] 国务院.铁路安全管理条例[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [8] 中国国家铁路集团有限公司工电部.国铁集团工电部关于加强穿(跨)越铁路营业线和临近营业线工程方案等审查和施工安全管理的通知[R].中国国家铁路集团有限公司工电部,2020.
- [9] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
- [10] GBT 51234—2017,城市轨道交通桥梁设计规范[S].
- [11] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [12] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].
- [13] GB 50157—2013,地铁设计规范[S].
- [14] 长江勘测规划设计研究有限责任公司.一种减小混凝土梁徐变挠度措施的方法:CN202210592561.X[P].2022-07-29.
- [15] 柳学发,徐升桥,任为东,等.莞惠城际轨道交通桥梁设计特点与技术创新[J].铁道标准设计,2021,65(2):60-66.