DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250418

大斜交现浇框架桥下穿小半径曲线铁路线路加固研究

庞孟丽,马海涛,宁正芳,周卫卫
(中铁工程设计咨询集团有限公司郑州设计院,河南 郑州 450001)

摘　要: 为了解决大斜交现浇框架桥下穿小半径曲线铁路时,存在铁路架空范围不足,架空体系支点转换繁琐,横向架空跨度小,框架桥难以一次性浇筑且常规方法不适用此类工况的问题,提出了一种纵横梁双重架空加固体系。其中一次架空体系是对线路轨道架空,纵梁平行于线路折线布置,横梁垂直于线路布置;二次架空体系作为一次架空体系的基础,纵梁平行框架桥布置,横抬梁垂直于纵梁布置,支撑于支点桩上。另外,采用桥梁博士 V4.4 建立了纵横梁双重架空加固体系的有限元空间模型,用以计算该体系的受力状态。计算结果表明,该体系的纵梁和横抬梁在施工阶段的应力及挠度均满足规范要求,可实现小半径曲线铁路线路的一次性整体架空,且横向架空跨度达 13.8 m,从而避免了施工过程中架空体系支点转换及框架桥结构的二次补筑,提高了结构的整体性,可应用于实际工程。

关键词: 大斜交框架桥;小半径曲线铁路;下穿工程;纵横梁加固;有限元法
中图分类号: U448.11;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0207-05

Research on Reinforcement of Large Skew Cast-in-situ Frame Bridge Down-crossing Small-radius Curve Railway Line

PANG Mengli, MA Haitao, NING Zhengfang, ZHOU Weiwei
(Zhengzhou Branch of China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to solve the problems that when a large skew cast-in-situ frame bridge crosses under a small-radius curve railway, there is a shortage of railway overhead range, the conversion of overhead system support points is cumbersome, the horizontal overhead span is small, and the frame bridge is difficult to be cast at one time and the conventional method is not applicable to such conditions, a double overhead reinforcement system of longitudinal beams and crossbeams is proposed. The first overhead system is the overhead of line track. The longitudinal beams are arranged in a zigzag line parallel to the line, and the crossbeam is arranged perpendicularly to the line. The second overhead system serves as the basis of the first overhead system. The longitudinal beams are parallel to the frame bridge, and the crossbeam is arranged perpendicularly to the longitudinal beam, which are supported on support piles. In addition, the Bridge Doctor V4. 4 is used to establish the finite element spatial model with a double overhead reinforcement system of longitudinal beams and crossbeams to calculate the stress state of this system. The results show that the stress and deflection of the longitudinal beams and crossbeams in the construction stage meet the requirements of the specification, which can realize the one-time overall overhead of small-radius curved railway lines and the horizontal overhead span reaches 13. 8 m so as to avoid the conversion of support points in the overhead system and the secondary reinforcement of the frame bridge structure, improve the overall structure, and is successfully applied in actual engineering.

Keywords: large skew frame bridge; small-radius curve railway; down-crossing project; reinforcement of longitudinal beam and crossbeam; finite element method

0　引　言

随着我国城市化进程加速,城市道路规模持续扩大,路网不断延伸,导致道路与既有铁路的交叉工程日益增多。框架桥下穿是道路穿越既有铁路的常

收稿日期:2025-04-16
作者简介:庞孟丽(1987—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

见形式，此类工程需在保证铁路不间断行车的条件下实施。因此，为了满足框架桥下穿时既有运营线的正常通车条件，需对线路进行加固[1-4]。

道路下穿既有铁路最常见的是下穿直线段铁路，一般采用D型便梁进行加固。D型便梁的最大优点是运输和拆装方便，应用较为成熟。国内学者针对D型便梁在顶进框架桥工程中的线路加固已经进行了大量研究，提出的加固方法有横撑式便梁法[5-6]、连续便梁法[7-8]和大跨度便梁法[9-10]等。

对于道路下穿曲线段铁路的情况，D型便梁也可适用，但仅仅适用于线路半径大于400 m的曲线铁路。而对于线路半径小于400 m的小半径曲线铁路，一般采用纵横抬梁加固。张青松[11]以4孔框架桥下穿曲线半径R=1 000 m单线铁路现浇法施工为例，采用纵横梁架空，纵梁采用3片1组“321贝雷梁”，跨度控制在9 m；横梁采用I50a，最大跨度10.8 m。田礼忠[12]以3孔连续框架桥下穿曲线半径R=380 m单线铁路顶进法施工为例，对纵横梁采用I56b的线路加固体系进行分析，3根1组纵梁跨度控制在7 m，横梁最大跨度4.635 m。张苒[13]以某顶进框构下穿双线铁路为例，对纵横梁分别采用I45b和I40b的线路加固体系，分析顶进过程中对线路采用注浆加固方式来控制纵横梁的跨度，并将横梁跨度控制为6 m。徐青[14]以2孔大斜交框架桥下穿曲线半径R=300 m双线铁路的顶进法施工为例，分析对纵梁I100、横梁I63c的线路加固体系进行分析，横梁横向跨度控制在8 m，并提出了纵梁折线连接板工艺。

综上所述，当前相关研究是顶进框架桥下穿方式较多，现浇框架桥偏少；下穿铁路直线段较多，曲线段偏少，且现浇框架桥下穿小半径曲线铁路采用的常规方法存在横向架空跨度偏小等不足。基于此，本文依托郑州市金水路西延道路工程下穿南北发线立交工程，针对现浇框架桥下穿小半径曲线铁路，提出一种纵横梁双重架空加固体系，用于大斜交现浇框架桥下穿小半径曲线铁路；同时建立有限元模型，对纵横梁双重架空加固体系的设计进行检算。通过制定合理的施工工序和施工措施，来保证施工过程中铁路运营的安全，并为类似工程的设计提供参考。

1　工程概况

以郑州市金水路西延道路工程下穿南北发线立交为研究对象。该节点位于金水路西延道路工程北段，桥位处道路位于直线上，单向3车道+人非车道，道路北段与南北发铁路相交，交叉处铁路里程为K0+979.6，道路与铁路交角22.4°。

该项目与南北发铁路交叉处位于下发场至海棠寺车站区间，南北发铁路行车对数为15列/d，行车速度为55 km/h。铁路为单线电气化铁路，60轨，混凝土枕。交叉处铁路位于曲线段，曲线半径R=300 m，铁路线路纵坡为8.1‰，铁路每隔约3 m设置轨距杆；轨道结构高约0.5 m，南侧地面低于路基约2.5 m，北侧地面与路基齐平。

铁路北侧和西南侧均为家属院，均为多层楼房；铁路南侧为陇海铁路上、下行线，该处陇海铁路为高填土路基，道路边线距离路基坡脚约31 m。工程平面布置图见图1。

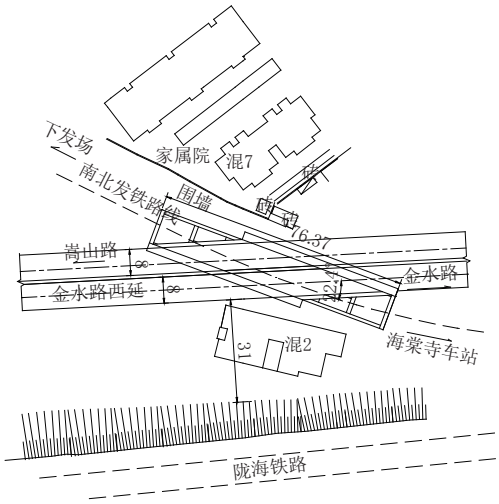

图1　工程平面布置图（单位：m）

2　大斜交框架桥布置

该工程与南北发铁路交叉处的交角为22.4°，且位于市区内，场地狭小，受周边建筑和陇海铁路的限制，选择合适的施工方法和框架的布置是该项目的难点。对于单线铁路、铁路线路不繁忙节点处，无预制场地时可采用开挖现浇施工。针对立交斜交角度大于45°，铁路轨道及设施受力不合理，不满足规范要求的状况，结构采用三角补齐、设置异形箱室的方法来实现铁路与结构的正交，优化结构的受力[15-16]，同时改善铁路设备受力。

该工程采用2~8 m连续式框架桥，结构按夹角23.4°设计，并将框架桥两侧补角成90°，顺铁路桥长达76.87 m。横铁路桥长10.85 m，两侧设2.5 m悬臂。框架桥结构高度10.8 m，结构净高8.1 m，顶板厚1.3 m，底板厚1.4 m，中墙、边墙墙身厚1.2 m。框架

桥平面布置图、横断面布置图见图2、图3。

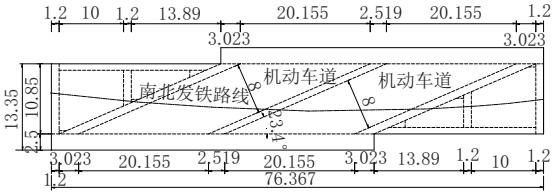

图2　框架桥平面布置图（单位：m）

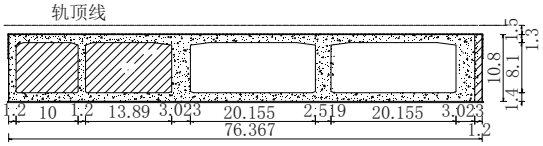

图3　框架桥横断面布置图（单位：m）

3　线路加固设计

3.1　设计思路

单股道小曲线半径铁路线下框架桥现浇施工时，若架空体系基础位于现浇框架范围内，则施工过程中会引起线路架空体系支点转换，且对应支点位置的框架桥结构需进行二次补筑。针对这种情况，进行了双重架空体系设计。其中一次架空体系采用纵横梁在满足铁路限界[17]前提下对线路进行加固，纵梁平行于线路折线布置，横梁垂直于线路布置；二次架空体系则采用纵横梁对线路进行加固，纵梁平行框架桥布置，横梁垂直于纵梁布置，支撑于支点桩上；同时对二次架空体系横梁进行加强设计，以加大横梁的横向跨度，使架空体系的支点位于现浇框架桥以外，整体上抬一次架空体系和铁路线路。对铁路进行大范围的整体一次性架空，可满足施工过程中架空支点不转换，结构一次性浇筑和铁路线路的稳定需求。

3.2　纵横梁设计

纵梁采用每根长 16 m 的I100工字钢，横梁采用长5.1 m的钢枕，横抬梁采用3703工字钢。一次架空体系为纵梁平行于线路按照折线布置，纵梁下吊长5.1 m的钢枕，钢枕垂直线路布置，钢枕支撑钢轨，穿入混凝土枕木之间。纵梁横向间距为5 m。钢枕与枕木间隔布置，并在轨底加设绝缘垫，以防止连接零件超出线路轨面和漏电。二次架空体系为纵梁平行框架桥布置，支点桩位置横抬梁组采用6 片 1 组3703工字钢，其余位置采用单片3703工字钢垂直纵梁布置，间距0.55 m。横抬梁在枕木下穿过，将枕木及其上轨道整体架空。为了减小横梁组的横向跨度，框架桥悬臂在主体结构施工完成后，架空支点转换到框架桥顶板上，再进行悬臂的施工。控制横抬梁组的横向架空跨度13.8 m；纵向架空长度大于箱桥基坑顶外不小于5 m，架空长度136 m。架空立面、平面布置图见图4、图5。

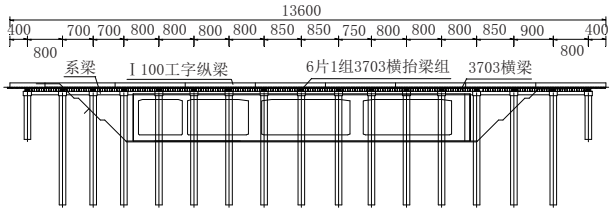

图4　架空立面布置图（单位：m）

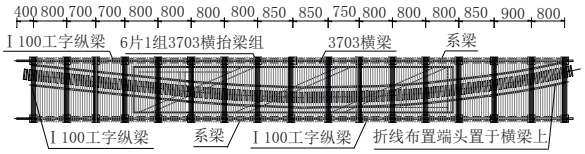

图5　架空平面布置图（单位：m）

3.3　架空支点桩设计

架空桩设置在框架桥两侧，距离线路中心6.9 m，采用直径1.5 m的C30钢筋混凝土钻孔灌注桩。架空桩顶设置L型台帽，尺寸1.8 m×1.8 m×1 m。纵向间距控制在9 m以内。为了加强基坑开挖时线路加固的稳定性，沿纵梁方向在台帽顶设置钢筋混凝土系梁，系梁尺寸1 m×0.8 m。架空断面布置图见图6。

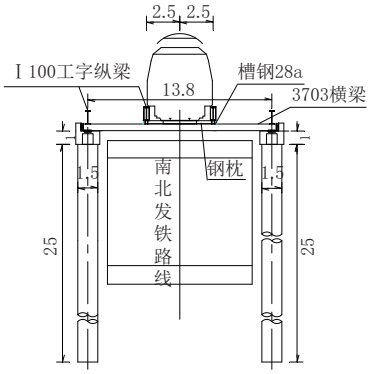

图6　架空断面布置图（单位：m）

4　线路加固方案静力分析

4.1　模型建立

采用桥梁博士V4.4建立纵横梁双重架空加固体系的有限元空间模型，分析框架桥基坑开挖完成后，在列车荷载作用下，纵梁、横抬梁的受力及变形状况。选取2×8.5 m范围按照实际尺寸建模，采用空间梁单元模拟纵梁、横梁，用虚拟梁单元模拟列车线位。有限元模型见图7，现场架空图片见图8。

4.2　边界条件

二次架空体系作为一次架空体系的基础，两者变形协同。纵梁与横抬梁交叉位置采用刚臂连接，

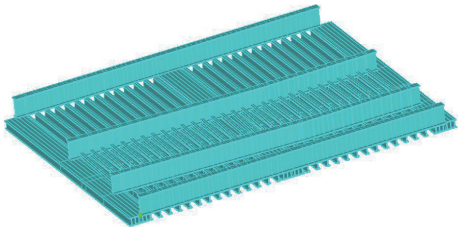

图7　有限元模型

图8　现场架空图片

架空支点桩位置均为一般竖向支承，各方向转动完全放开。

4.3　荷载

荷载分为恒载和活载两部分。

（1）恒载分别为架空设备自重、轨道自重、枕木自重。3703横梁是由2根[40c槽钢在上下翼缘加焊厚度20 mm的Q235qD钢板加强后，断面左侧槽钢和右侧槽钢在腹板处通过ϕ22 mm螺栓连接组成。钢轨每延米重60 kg/m，单根枕木重300 kg，单根钢枕重335 kg。构件截面参数见表1。

（2）活载使用ZKH荷载沿线路纵向进行动态加载，并考虑动载冲击作用。

（3）荷载传力路径：列车荷载→钢轨→一次架空体系→二次架空体系→架空桩。

表1　构件截面参数表

构件	质量/（kg·m^{-1}）	惯性矩 I_x/cm^4	抗弯截面系数 W/cm^3
Ⅰ100纵梁	409.6	787 228	14 224
单根3703横抬梁	202.4	69 388	3 154

4.4　控制指标

（1）强度指标。依据《铁路桥梁钢结构设计规范》（TB 10091—2017），Q235qD钢容许应力为：弯曲应力[σ]=140 MPa，剪应力[σ]=80 MPa。

（2）刚度指标。依据《普速铁路线路修理规则》（TG/GW102—2019），v_{max}≤80 km/h的正线和到发线，线路轨道静态几何不平顺容许偏差管理值高差控制值为22 mm。

4.5　计算结果

提取纵梁、横抬梁在主力（恒载+活载）工况下的应力、位移，结果见表2。

表2　应力、位移计算结果

构件	正应力最大值/MPa	剪应力最大值/MPa	挠度最大值/mm
Ⅰ100纵梁	51.09	5.40	15.488
钢枕	54.41	2.56	15.486
单根横抬梁	52.06	5.30	15.487
3703横抬梁组	47.48	3.98	15.477

由表2可知：纵梁、横抬梁的应力均满足《铁路桥涵设计规范》（TB 10002.1—2017）要求；位移在控制值22 mm以内。纵横梁双重架空体系满足铁路安全运营的要求。

5　施工工序及加固措施

5.1　施工工序

挖孔桩施工、线路架空、框架桥现浇期间，需向铁路部门申请慢行，限速45 km/h，并加强防护，确保铁路运营安全。

施工工序为：施工准备→线路两侧施工架空挖孔桩→拼装架空设备→穿横抬梁、钢枕→线路架空→基坑开挖→现浇框架桥→架空支点转换→施工框架桥悬臂、框架桥两侧支挡结构→基坑回填→拆除架空设备；然后补充Ⅰ级道碴，按原标准恢复线路。位于道路范围内的挖孔桩凿至路床以下，道路范围外的挖孔桩，桩头凿至路肩下。

5.2　加固措施

（1）对处于曲线段的线路架空，纵横梁连接完成后，在轨道与纵梁间设硬木支撑，每隔2 m设1道，以确保线路方向。

（2）为了保证曲线段超高，在设置架空桩时，按照既有超高值控制线路两侧架空桩承台标高，并在施工过程中及时检查线路，采用钢支墩和硬木楔块进行垫平来调整线路，使线路满足超高要求。

（3）纵梁架设到位后，纵梁与纵梁、纵梁与横抬梁及时进行连接、稳定，防止纵梁倾覆。

（4）采用长10 cm的28a槽钢将内侧纵梁、长钢枕与横抬梁焊接卡住纵梁，以限制纵、横梁间的位移。

（5）横抬梁组端部与台帽间设置橡胶垫板，限制横抬梁组的横向位移；支点桩台帽顶及系梁顶预埋角钢，分别设置在横抬梁的两侧，限制横抬梁的纵向位移。

（6）为防止形成软硬不均匀路基，新建框架桥与填土路基间设硬化过渡段，采用注浆加固处理。处理范围：横向与框架桥主体长度相同，顺铁路方向深

为框架桥结构高度 H，底宽 3 m，顶宽 $3+2H$。

6 结　语

（1）纵横梁双重架空加固体系攻克了常规的单股道小曲线半径（$R\leqslant400$ m）铁路架空范围小的难题。

（2）纵横梁双重架空加固体系的强度、刚度等指标均满足规范要求，保证了框架桥现浇施工过程中列车运营安全。

（3）纵横梁双重架空加固体系整体一次性架空，横向跨度 13.8 m，避免了施工过程中架空体系支点转换及框架桥结构二次补筑，提高了结构的整体性。

（4）纵横梁双重架空加固体系横向跨度加大，架空桩施工方法不再受限，可采用钻孔灌注桩，减少上道作业时间。

参考文献：

[1] 尚培培．双孔框构桥下穿重载铁路顶进施工条件下线路加固技术研究[J]. 铁道建筑，2021，61（4）：39-43.
[2] 黄永辉．顶进多孔框构桥铁路线路架空加固方案设计[J]. 科学技术创新，2022（30）：135-138.
[3] 杨建豹．纵横抬梁法加固线路施工安全控制措施[J]. 铁道建筑，2021，61（6）：151-153.
[4] 赵大亮，刘金国，郭小亮，等．下穿铁路咽喉道岔区线路加固体系研究[J]. 铁道工程学报，2024，41（5）：34-40.
[5] 赵志清．横承式便梁法工程应用深化研究[J]. 铁道工程学报，2021，38（7）：28-34.
[6] 徐洪权，王砺文，夏宁，等．铁路既有线新型加固方法-横承式便梁法方案研究[J]. 铁道标准设计，2019，63（8）：85-89.
[7] 郭铮．新型多层组合连续钢便梁设计与力学性能分析[J]. 铁道建筑，2023，63（3）：77-81.
[8] 董传芹，闫利明，孙震，等．新型连续钢便梁的设计与应用[J]. 铁道建筑，2020，60（11）：21-25.
[9] 李士中．下穿京沪铁路南京站咽喉区大孔径框架桥设计与施工[J]. 铁道建筑，2019，59（111）：33-36.
[10] 朱恩星．城市道路下穿铁路框架桥顶进施工技术[J]. 国防交通工程与技术，2021，19（1）：68-71.
[11] 张青松．既有线上就地现浇框架桥线路加固工程的设计和施工[J]. 铁道标准设计，2008（10）：28-30.
[12] 田礼忠．大跨度框架桥小半径曲线铁路线路加固技术研究[J]. 价值工程，2016，35（29）：137-140.
[13] 张苒．顶进框构桥纵横梁加固法设计分析与应用[J]. 铁道建筑，2018，58（6）：43-46.
[14] 徐青．小曲线半径铁路大斜交顶进框架桥的设计与研究[J]. 铁道勘察，2017，43（3）：108-112
[15] 尤广杰．下穿既有铁路大斜交框架桥结构分析[J]. 铁道勘察，2016，42（5）：98-101.
[16] 李家稳．地道桥设计与施工[M]. 北京：中国铁道出版社，2011.
[17] GB 146.2—2020，标准轨距铁路限界[S].

（上接第 206 页）

洪，2024（1）：94-97.
[9] 张冕轩．非对称独塔斜拉桥多曲面拱形桥塔施工及成桥关键问题分析[D]. 成都：西南交通大学，2020.
[10] 李杰，郑建新，杨切，等．超高空间异形曲面索塔线形控制技术研究[J]. 科学技术与工程，2023，23（12）：5285-5293.
[11] 雷娜，冯宇豪，段君毅，等．有限元网格生成方法综述[J]. 电子科技大学学报，2024，53（6）：816-843.
[12] 赵炳荧，李新．基于多边形控制网的通用 NURBS 曲面[J/OL]. 计算机辅助设计与图形学学报，1-8[2025-05-29].
[13] 王磊，杨彬，张其林．非均匀有理 B 样条曲面形状优化方法[J]. 湖南大学学报（自然科学版），2012，39（7）：14-19.
[14] 黄兵锋，李莹，郑冬黎．CATIA V5 二次开发技术在汽车上应用现状[J]. 机械设计与制造，2012（11）：246-248.
[15] 彭家贵，陈卿．微分几何[M].2 版．北京：高等教育出版社，2021.
[16] 刘新华，周勇，唐文峰，等．大跨独塔斜拉桥异形索塔抗风性能研究[J]. 公路工程，2020，45（6）：155-160.
[17] 曹婷，施沃兹·约瑟夫．直纹的曲面之美——光滑复合双曲面结构的原理与设计运用[J]. 建筑学报，2021（11）：104-109.