

曲线混凝土梁顶推施工工艺研究

陈建峰

(北京首发承平京平高速公路经营有限公司,北京市 101200)

摘要:以京包高速公路上地铁分离式立交主桥(大跨度独塔单索面预应力混凝土曲线斜拉桥)的212 m长、35.5 m宽、自重达25 000 t的混凝土曲线箱梁顶推施工工程为背景,系统研究复杂线形、大吨位宽体混凝土箱梁长距离、单点曲线顶推施工的关键技术。依据工程具体情况,详细阐述了针对曲线梁顶推的专项结构设计处理、基于两点限位原理的顶推轨迹与纠偏控制体系、高性能MGE滑块滑道系统、大吨位连续牵引系统以及基于光纤光栅技术的全过程动态监控系统。通过理论计算(MIDAS Civil/FEA有限元仿真)、试验段验证和施工全过程实测数据的对比分析,验证了“两点限位”的纠偏系统和“同力不同速”的牵引控制能够实现梁体轨迹的精准控制。上地铁路桥的成功实践,为我国大跨度复杂线形混凝土桥梁顶推施工提供了宝贵的设计与施工经验。

关键词:曲线混凝土箱梁;顶推施工;施工设计;两点限位;纠偏控制;动态监控

中图分类号:U445.462;TU997

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2026)06-0391-05

Research on Incremental Launching Construction Design of Curved Concrete Girders

CHEN Jianfeng

(Beijing Shoufa Chengping Jingping Expressway Operation Co., Ltd., Beijing 101200, China)

Abstract: Taking the incremental launching construction of the 212-meter-long, 35.5-meter-wide, self-weight 25 000-ton curved concrete box girder of the main bridge of the Shangdi Railway Grade-Separated Interchange on the Jingba Expressway (a long-span single-pylon single-cable-plane prestressed concrete curved cable-stayed bridge) as the engineering background, this paper systematically investigates the key technologies for long-distance, single-point curved incremental launching construction of complex-shaped, large-tonnage, wide concrete box girders. The paper elaborates on the specialized structural design measures for curved girder launching, the launching trajectory and deviation correction control system based on the two-point limiting principle, the high-performance MGE slider-skidway system, the large-tonnage continuous traction system, and the entire-process dynamic monitoring system based on Fiber Bragg Grating (FBG) technology. Through comparative analysis of theoretical calculations (MIDAS Civil/FEA finite element simulation), test segment validation, and measured data from the entire construction process, the feasibility, safety, and accuracy of the construction design scheme are verified. Key technical challenges encountered during construction and corresponding countermeasures are summarized. The successful implementation of this project provides valuable design and construction experience for the incremental launching construction of long-span, complex-shaped concrete bridges in China.

Keywords: curved concrete box girder; incremental launching construction; construction design; two-point limiting; deviation correction control; dynamic monitoring

0 引言

顶推法是一种先进的桥梁施工方法,其以施工场地需求相对集中、对桥下交通干扰小、安全质量易于控制等优点,在预应力混凝土连续梁、连续刚构及

部分特殊结构桥梁建设中得到了广泛应用。随着桥梁建设向大跨径、复杂线形(平曲线、竖曲线、超高)方向发展,传统的直线顶推技术面临挑战。曲线梁顶推施工中,梁体因线形产生的偏转效应、顶推轨迹控制、临时结构受力不均等问题尤为突出^[1]。

王景全^[2]构建了混凝土梁顶推的理论与仿真体系;向中富等^[3]阐明曲线梁顶推力学行为与纠偏控制原理;刘士林等^[4]规范了箱梁顶推工艺与质量控

收稿日期:2026-03-10

作者简介:陈建峰(1979—),男,学士,高级工程师,从事高速公路管理工作。

制要点;李宏江等^[5]验证了光纤光栅监测的适用性,为本文研究提供完整技术支撑。

本文依托的京包高速公路上地斜拉桥主跨212 m混凝土曲线箱梁顶推工程,其顶推段梁体自重(25 000 t)和桥宽(35.5 m)均为当时国内曲线混凝土箱梁单点顶推施工之最,最大悬臂达63 m,且需上跨既有铁路和城铁,施工环境复杂,技术难度极大。本文旨在系统总结该工程顶推施工的核心设计内容,包括为适应顶推施工进行的梁体结构优化、顶推系统设计、施工控制体系建立等,以期为类似工程提供借鉴。

1 工程概况与顶推方案确定

1.1 工程概况

京包高速公路上地斜拉桥为46 m+46 m+230 m+98 m+90 m五跨连续独塔单索面预应力混凝土斜拉桥。主跨230 m,其中跨越铁路段为长212 m的预应力混凝土曲线箱梁(B段)。该梁段位于 $R=3\ 500$ m的平曲线和竖曲线上,桥宽35.5 m,单箱五室截面,自重约25 000 t。桥位处上跨既有京包铁路、城铁十三号线及规划线路,交角约 19° ,施工安全要求极高,场地受限多。

1.2 施工方案比选与确定

考虑到桥下铁路运营繁忙、场地狭窄、梁体吨位大且线形复杂,预制吊装、支架现浇、转体等常规方法均不适用。经综合比选,决定采用“单点曲线顶推(拖拉)”法施工。即在桥塔后侧支架上预制全长212 m的B段梁体,利用设置在4号主塔墩上的反力座和梁体尾端的后锚点,通过钢绞线牵引系统,将梁体沿预设的曲线轨迹拖拉213 m就位。该方案能最大限度减少对桥下铁路的干扰,充分利用永久结构,并适应复杂的曲线线形。

2 顶推施工专项结构设计

为满足顶推施工要求,对梁体及临时结构进行了针对性设计。

2.1 梁体结构适应化设计

为使顶推轨迹简洁可控,对设计线形进行了施工优化,图1所示为曲线箱梁的平面和横断面图。

2.1.1 平面线形

以顶推段起点和终点为控制点,采用一段 $R=3\ 500$ m的圆曲线拟合原设计线路轴线,作为顶推轨迹基准线。梁体底板和用于横向限位的腹板垂直段按此圆曲线对称布置,而顶板则维持原设计线路,两

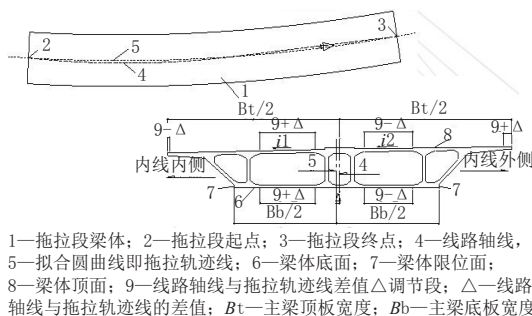


图1 曲线箱梁结构设计图

者差值通过调整箱室宽度过渡。

2.1.2 纵断面线形

将梁体首尾最低点连线作为理论底面线(即竖向顶推轨迹线),原设计的竖曲线通过变梁高实现,横坡通过腹板高度变化实现。

2.1.3 关键构造加强

在梁体顶板和底板内共设置48束临时预应力钢束,以承受顶推过程中的最大悬臂弯矩^[6]。梁体尾端设置加强的后锚固块,用于牵引索锚固。与钢导梁连接处设计钢-混结合段,确保应力平顺传递。

2.2 临时墩及滑道系统设计

2.2.1 临时墩布置

图2所示为临时墩的布置示意图;沿 $R=3\ 500$ m的顶推轨迹线共设置21个临时墩(L1~L21)。考虑跨越铁路和场地限制,临时墩间距不等,最大达49 m。临时墩采用钢管柱结构,柱内下部填混凝土,上部填砂以增强稳定性。L3内侧墩因靠近铁路,设计为特殊的钢箱梁悬臂结构。



图2 临时墩布置图

2.2.2 滑道系统

每个墩顶设置滑道,由调坡钢楔块、40 mm钢板+4 mm不锈钢板组成的滑板以及MGE滑块组成。MGE滑块尺寸为440 mm×400 mm×30 mm,具有摩擦系数小(静摩擦系数约0.07,动摩擦系数约0.056)、动静摩擦系数值接近、抗压强度高、弹性好等优点,利于顶推和纠偏。滑道端部设圆弧倒角便于滑块喂入。

2.3 牵引与反力系统设计

2.3.1 反力系统

充分利用4号主塔墩,在其上浇筑钢筋混凝土反力座,布置12个牵引索孔道。

2.3.2 牵引系统

采用 12 台 200 t 连续式穿心千斤顶,配套 6 套液压泵站和计算机控制系统。牵引索采用 1 860 MPa 级钢绞线。控制系统能实现“同力不同速”控制,即通过调节曲线内外侧千斤顶的顶进速度差,使梁体沿曲线弦线方向牵引,同时自动适应内外侧行程差。

2.4 横向限位与纠偏系统设计

基于“两点限位”原理进行设计,在顶推任一时刻,仅在最靠近梁体首、尾的两个支承墩上设置有效的横向约束^[7]。

2.4.1 限位装置

主要为外包工程橡胶的钢滚轴,允许梁体在微小阻力下沿其滚动,用于限制梁体向该侧偏移。

2.4.2 纠偏装置

图 3 所示为纠偏装置布置图,图 4 所示为临时墩上纠偏装置的具体构造;纠偏装置采用液压千斤顶,当其活动端滑块与梁体接触时,可主动施加横向力进行纠偏。

2.4.3 布置策略

根据计算,顶推前 109 m 梁体尾端有向曲线内侧偏移趋势,前端有向外侧偏移趋势;109 m 后趋势相反。因此,在相应阶段的头尾墩的预测受压侧布置限位滚轴(与梁体预留小间隙或密贴),另一侧布置纠偏千斤顶(预留约 5 cm 间隙)。装置随顶推进程前移倒用。

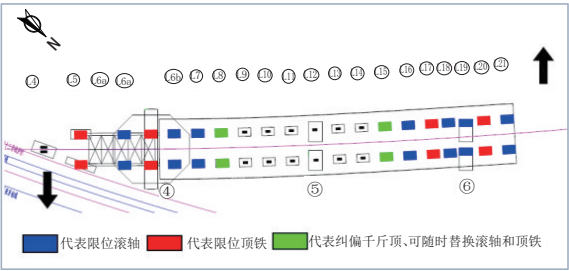


图 3 纠偏装置布置图

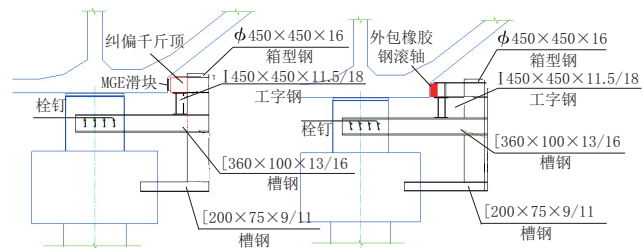


图 4 临时墩上纠偏、限位装置

3 施工过程仿真分析与控制标准

3.1 有限元仿真分析

采用 MIDAS Civil 和 MIDAS FEA 软件建立全桥模

型,模拟整个顶推过程(每前进 1 m 为一个工况)。

主梁、钢导梁等采用梁单元进行模拟;MGE 滑块与滑道采用接触单元模拟,横向限位和纠偏装置采用弹簧单元简化,临时墩采用竖向弹性支撑模拟。

主梁 C55 混凝土:弹性模量为 3.55×10^4 MPa,泊松比为 0.2,重度 25 kN/m³;Q345 钢结构:弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3,重度为 78.5 kN/m³。

计入结构自重、48 束临时预应力等效节点力、顶推牵引力、纠偏横向力(最大 1 000 kN);施加最不利工况荷载:L3 内侧墩强制沉降 30 mm、整体升温 15℃、降温 10℃。

3.1.1 主梁受力分析

计算表明,在考虑临时墩最不利沉降工况下,混凝土主梁最大压应力为 23.27 MPa(小于 C55 混凝土允许值 24.85 MPa),最大拉应力为 0.48 MPa;钢导梁最大应力 98.3 MPa。横隔板局部应力通过平面、梁格、实体模型对比分析,确定最不利拉应力为 2.05 MPa,施工中需重点关注。

3.1.2 临时墩受力分析

正常工况下临时墩应力均小于 140 MPa。但在滑块填塞不利导致支反力不均时(如 L3 外侧墩内外反力比达 2.18),个别临时墩应力可达 220 MPa,接近 Q345 钢材容许应力 240 MPa,需严控。

3.1.3 纠偏力分析

平面分析显示,顶推力、摩擦力及理论纠偏力对主梁整体应力影响很小。

3.2 施工控制标准制定

基于仿真分析,制定了详尽的监控预警机制和报警值^[8-9]:

(1)应力控制:主梁压应力预警值为 20 MPa,报警值为 23.5 MPa;临时墩应力预警值为 160 MPa,报警值为 200 MPa。

(2)位移控制:导梁最大挠度报警值为 70 cm;混凝土梁前端挠度报警值为 30 mm;梁体轴线累计偏差报警值为 40 mm,单阶段偏差报警值为 10 mm;根据刚度设定各临时墩纵横向位移的预警报警值(通常为 1~6 mm)。

(3)顶推力控制:纠偏千斤顶最大顶力不得超过 1 000 kN(限位架承载极限)。

4 关键施工技术措施

4.1 试验段验证

顶推前制作试验段,实测了 MGE 滑块在不同压

应力(0.40~9.83 MPa)下的静、动摩擦系数,验证了滑道喂送、横向限位装置(滚轴与千斤顶)的工作性能、牵引系统同步性及顶推速度(≥ 12 m/h),演练了工人操作工序,为正式施工提供了可靠参数^[10-13]。图5所示为试验段箱梁照片。



图5 现场试验段

4.2 动态监控与信息化施工

4.2.1 监测手段

采用光纤光栅传感技术,在主梁关键截面(7个纵向断面、6处横隔板)布置152个埋入式应变计,在22个临时墩上布置86个表面式应变计,实现了应力应变的分布式、实时、高精度监测,避免了传统传感器线路繁杂、易受干扰的缺点。图6所示为临时墩上应变计布置示意图。

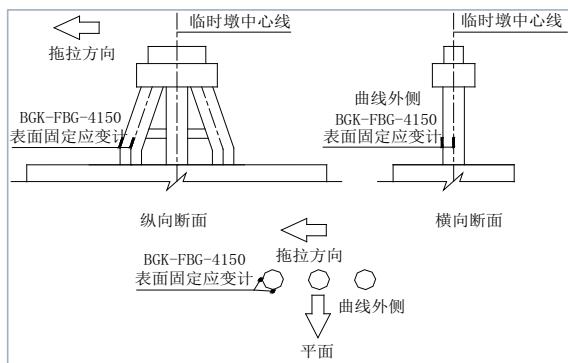


图6 临时墩应变计布置示意图

4.2.2 监测内容

全程监控主梁应力、临时墩应力与位移、梁体轴线偏位、标高、导梁挠度、千斤顶顶力等。

4.2.3 信息反馈与决策

监测数据实时传输至指挥中心,结合视频监控和自主研发的“中心偏位自动显示仪”,实现快速反馈。通过对比实测数据与理论预警值,指挥长可果断发出顶推、暂停或纠偏指令。

4.3 顶推实施与纠偏工艺

4.3.1 分次顶推

分10次进行顶推,前2次试顶,后8次利用铁路

夜间窗口时段施工。

4.3.2 纠偏操作

(1)通过调整曲线内外侧千斤顶的顶进速度差实现宏观纠偏。

(2)当测量发现梁体偏离预设轨迹,导致限位装置间隙变化或临时墩受力超预警时,启动纠偏千斤顶施加横向力,将梁体“推回”正确轨迹,直至限位装置重新密贴,实现微观纠偏。

5 实施效果与对比分析

5.1 实施效果

2011年5月7日,顺利完成梁体213 m顶推就位。梁体轴线偏差仅3 mm,纵向偏差2 mm,就位精度高。主梁及临时墩应力、位移均未超过报警值,梁体未出现结构性裂缝,确保全过程结构安全。

5.2 实测与理论对比分析

5.2.1 应力对比

主梁纵向应力实测值与理论值吻合良好,大多偏大0.1~0.3 MPa,结构处于安全储备。临时墩应力在滑块填塞不利工况下,实测与理论值高度吻合,验证了“对角线受力原则”(即滑块填塞不利点及其对角线点受力较小,另一对角线点受力较大)。

5.2.2 位移对比

导梁最大挠度实测值为22 cm(理论值为25 cm),混凝土梁前端最大挠度实测值为25 mm(理论值为30 mm)。临时墩位移实测值均小于或接近理论值。

5.2.3 纠偏效果

通过动态调整,梁体轴线偏差始终控制在允许范围内,证明了“两点限位”纠偏体系的有效性。

6 结论与建议

6.1 结论

(1)通过对曲线梁进行以顶推轨迹为基准的适应化设计,将复杂的线路几何问题简化为沿固定圆曲线和弦线方向的运动控制问题,是曲线梁顶推成功的基础。

(2)基于“两点限位”原理设计的纠偏系统,结合“同力不同速”的牵引控制策略,能有效克服曲线顶推产生的偏转效应,实现梁体轨迹的精确控制。

(3)采用高性能MGE滑块和光纤光栅实时监控系統,显著提升了顶推施工的顺畅性、安全性和可控性。

(4)详尽的施工过程仿真分析、试验段验证以及

全过程动态监控构成的“预控—实控—反馈”体系,是确保大吨位复杂结构顶推施工安全成功的核心。

(5)本工程形成的跨既有铁路大跨度斜拉桥混凝土曲线箱梁长距离单点顶推成套技术是可行、安全、高效的,填补了国内相关技术空白。

6.2 建议

(1)对于大吨位混凝土曲线梁顶推,临时墩间距不宜过大(建议 20~30 m 为宜),以避免梁体上墩困难及由此引发的严重偏转和临时墩受力不均。

(2)钢导梁与混凝土梁的刚度宜平顺过渡,可采用在导梁上浇筑变截面混凝土等方式,改善结合部应力集中和滑块喂送条件。

(3)可进一步优化滑道入口坡度和滑块尺寸,研究更厚或性能更优的滑块材料,以提升滑块填塞的顺畅性和耐久性。

(4)本工法可推广至其他受地形、交通限制需采用顶推法施工的复杂线形大跨度混凝土桥梁或钢箱梁桥。

参考文献:

[1] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2001.

- [2] 王景全.大跨度混凝土桥梁顶推施工关键技术研究[D].南京:东南大学,2010.
- [3] 向中富,王能超.混凝土曲线梁桥顶推施工力学行为与控制技术[J].中国公路学报,2012,25(3):78-85.
- [4] 刘士林,王似舜.预应力混凝土箱梁顶推施工工艺与质量控制[J].公路,2009(7):112-116.
- [5] 李宏江,张喜刚,陈伟民.光纤光栅传感技术在桥梁施工监控中的应用[J].土木工程学报,2008,41(6):88-93.
- [6] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] 秦阳.单点顶推大吨位宽体箱梁施工技术研究[D].西安:长安大学,2007.
- [8] 崔科宇.多点曲线连续顶推施工技术[D].成都:西南交通大学,2003.
- [9] 田仲初,陈耀章,赵利平,等.连续钢梁顶推过程局部接触分析及改善措施[J].长安大学学报(自然科学版),2012(4):44-50.
- [10] 田亮,赵健,李向海.三门峡黄河公铁两用桥钢桁梁顶推动力学分析[J].铁道工程学报,2020(7):35-40.
- [11] 彭子祥,姚昌荣,李亚东,等.顶推施工中混凝土箱梁横向支撑不平的局部受力分析[J].西部交通科技,2017(12):38-42.
- [12] 毛颖.预应力混凝土连续梁大跨径顶推新技术[J].公路交通科技(应用技术版),2014(6):225-229.
- [13] 陈杰.解析大跨径预应力混凝土连续梁桥施工技术[J].中国科技博览,2011(8):119-119.

(上接第 344 页)

- 改扩建[J].中国给水排水,2017,33(22):67-70.
- [12] 朱文明,曲颂华,王妍春,等.外进内出式纤维转盘滤池的流场数值模拟分析[C]//中国环境科学学会学术年会论文集(2015).北京:中国学术期刊(光盘版)电子杂志社,2015:2750-2757.
- [13] 田庆玲,李墨洋,王欢,等.纤维转盘滤池运行维护管理的研究[J].天津建设科技,2021,31(5):46-48.
- [14] 刘瑶,吴康宁,张大群.《给水排水用格栅除污机通用技术条件》创新点解析[J].中国给水排水,2014,30(12):158-160.
- [15] 周家中,宋平周,张爽,等.占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计[J].中国给水排水,2021,37(12):76-82.

- [16] 盖鑫.芜湖市某污水处理厂二期提标扩容工程设计[J].中国给水排水,2023,39(14):80-84.
- [17] 陈秀成.嘉兴联合污水处理厂提标改造工程设计及经验总结[J].中国给水排水,2020,36(4):47-52.
- [18] 梁仁礼,谢天,胡勇有.某产业园综合污水处理厂 AAO-BAF 工艺设计及应用[J].给水排水,2024,50(10):88-92.
- [19] 张宁.城镇污水处理厂节地技术研究与工程应用[J].城市道桥与防洪,2023(11):126-129.
- [20] 蒋岚岚,龚兆宇,胡邦,等.无锡城北污水处理厂 MBR 系统运行效果分析与探讨[J].环境工程,2013,31(2):1-4.