

DOI: 10.7672/sgjs2026100108

曲线钢桁梁斜拉桥转体施工技术

王东旭

(中铁六局集团有限公司, 北京 100036)

[摘要] 国道109新线高速公路安家庄特大桥上跨丰沙铁路桥地处山区河谷,建设环境恶劣,施工技术难度极高,曲线钢桁梁斜拉桥横向不对称偏心显著,拼装过程中易受水平力作用发生偏移,梁体重心持续动态转换,给桥梁体系转换及墩顶转体稳定性控制带来巨大技术挑战与施工风险。通过在墩顶节点设置悬拼临时墩与墩顶转体系统,依托大偏心配重三点支撑技术提升转体稳定性,同时融合BIM技术开展参数建模核查、工况模拟推演,优化安装工艺流程,强化施工过程监控,最终顺利实现双幅曲线钢桁梁斜拉桥高空墩顶体系转换与转体施工。

[关键词] 桥梁工程;钢桁梁;体系转换;墩顶转体;施工技术

[中图分类号] U448

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)10-0108-06

Swivel Construction Technology of Curved Steel Truss Cable-stayed Bridge

WANG Dongxu

(China Railway Sixth Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: The Anjiazhuang Bridge of the National Highway 109 New Line Expressway is located in the mountainous valley of the Fengsha Railway Bridge. The construction environment is harsh and the construction technology is extremely difficult. The transverse asymmetric eccentricity of the curved steel truss cable-stayed bridge is significant. During the assembly process, it is easy to be offset by the horizontal force, and the center of gravity of the beam is continuously and dynamically converted, which brings great technical challenges and construction risks to the bridge system conversion and the stability control of the pier top rotation. By setting up a cantilever temporary pier and a pier top rotation system at the pier top node, the rotation stability is improved by relying on the three-point support technology of large eccentric counterweight. At the same time, BIM technology is integrated to carry out parameter modeling verification, working condition simulation and deduction, optimize the installation process flow, and strengthen the construction process monitoring. Finally, the high-altitude pier top system conversion and rotation construction of double-curved steel truss girder cable-stayed bridge are successfully realized.

Keywords: bridges; steel truss girder; system conversion; pier top rotation; construction

1 工程概况

国道109新线高速公路安家庄特大桥上跨丰沙铁路桥坐落于北京市门头沟区王平镇安家庄村西南,线路呈东西走向,桥梁左、右线分幅排布,始于丰沙铁路北侧的黄台隧道出口,以转体形式依次跨越丰沙铁路、永定河及109国道。桥址两侧山体坡度陡峭,与既有丰沙铁路的交角约为 30° ,山区河谷地形复杂,多类交通线路交叉跨越,构成了严苛的

施工环境。效果如图1所示。



图1 安家庄特大桥上跨丰沙铁路桥效果

Fig. 1 Effect of Anjiazhuang Bridge over Fengsha Railway Bridge

[作者简介] 王东旭,总工程师,正高级工程师,E-mail: wangdongxu@creeg.com

[收稿日期] 2025-11-08

桥梁结构左幅采用248m+248m双索面钢桁梁

斜拉桥方案,顺桥向共设 42 个节间,标准节间长 11.8m,主桁中心线间距 19.0m;主墩附近主桁高 15m,标准段主桁高 8m,桥梁平面位于半径为 1 600m 的圆曲线上。左幅配置永久钢塔,采用塔梁固结设计,桥面以上塔高 70m,共布设 36 根斜拉索。主墩桩基选用 20 根 $\phi 2\,000$ 钻孔灌注桩,墩柱为直径 4m、高 30.125m(材质为 90mm 厚 Q500MD+4mm 厚 316L 不锈钢)的钢管混凝土结构,与右幅共用一座总长 60m、宽 7m 的钢盖梁,该盖梁采用单箱三室变高截面,主墩处高度 8m,跨中高度 5.5m。

右幅采用 171m+171m+75m 连续钢桁梁结构,顺桥向共 36 个节间,标准节间长 11.4m,主桁中心线间距 13.5m;主墩附近主桁高 15m,标准段主桁高 8m,桥梁平面位于半径为 1 500m 的圆曲线上。其中 171m+171m 为转体段,施工时需设置临时扣塔与扣索,桥面以上扣塔高 51m,转体完成后开展 75m 跨施工。主墩桩基采用 11 根 $\phi 2\,000$ 钻孔灌注桩,墩柱为直径 3m、高 31.125m(材质为 90mm 厚 Q500MD+4mm 厚 316L 不锈钢)的钢管混凝土结构,与左幅共用同一钢盖梁,盖梁主墩处高度 7m,跨中高度 5.5m。

左、右幅钢桁梁悬臂拼装阶段,需提前搭设主墩墩旁临时支架与悬拼临时支架。转体阶段,为满足滑道布置要求,沿滑道圆周布设临时墩,临时墩基础采用桩-承台结构,主体为双肢钢管柱,顶端设置钢箱结构分配梁,分配梁上方铺设滑道梁,滑道梁与盖梁顶保持同一高程,其上安装滑道装置。双幅桥采用旁位拼装墩顶同步转体法施工,左幅转体重达 15 800t,需逆时针转体 25°;右幅转体重 9 400t,需逆时针转体 24°。

2 施工重难点

- 1)曲线钢桁梁拼装及转体过程中重心动态偏移,易引发结构失稳。
- 2)支架与转体系统为柔性结构,高空墩顶作业的各向稳定性控制难度极大。
- 3)双幅桥同步转体需兼顾精度与安全,对协同控制技术要求高。

3 钢桁梁体系转换

体系转换是衔接钢桁梁拼装与转体施工的关键环节,核心目标是实现受力状态从“球铰+悬拼支点”到“球铰整体受力”的平稳过渡,从根源上解决曲线钢桁梁重心偏移带来的稳定性隐患。

3.1 工艺原理

曲线钢桁梁斜拉桥在拼装过程中,会受不同程度水平力作用产生偏移,梁体重心随之发生动态转

换。为解决墩顶悬拼稳定性控制的核心难题,创新选取墩顶节点区域设置不同吨位悬拼支点,如图 2 所示,左幅主墩附近共设 6 个悬拼支点,右幅主墩附近同样布设 6 个悬拼支点。曲线钢桁梁拼装完成后,由球铰与悬拼支点共同承担荷载,经理论预配重平衡后,需将所有悬拼支点完全脱空,实现受力体系向球铰整体受力的转换,为后续称重及转体施工创造条件。

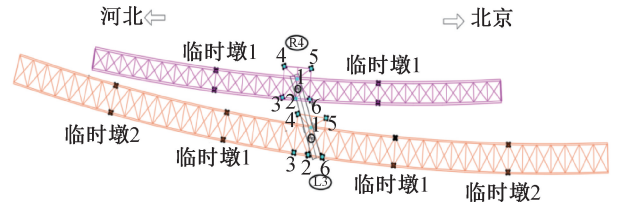


图 2 悬拼支点平面布置
Fig. 2 Plane layout of suspended fulcrum

本工程首次创新应用大吨位滑块卸落刚性装置,成功替代传统大吨位砂箱,彻底解决了曲线钢桁梁拼装及体系转换过程中传统砂箱易出现不均匀沉降的问题。该装置操控便捷、精度可控,大幅降低了体系转换阶段的安全风险。通过受力分析优化支点设计,曲线外侧悬拼支点采用卸落滑块装置,曲线内侧悬拼支点采用刚性抄垫,如图 3 所示。

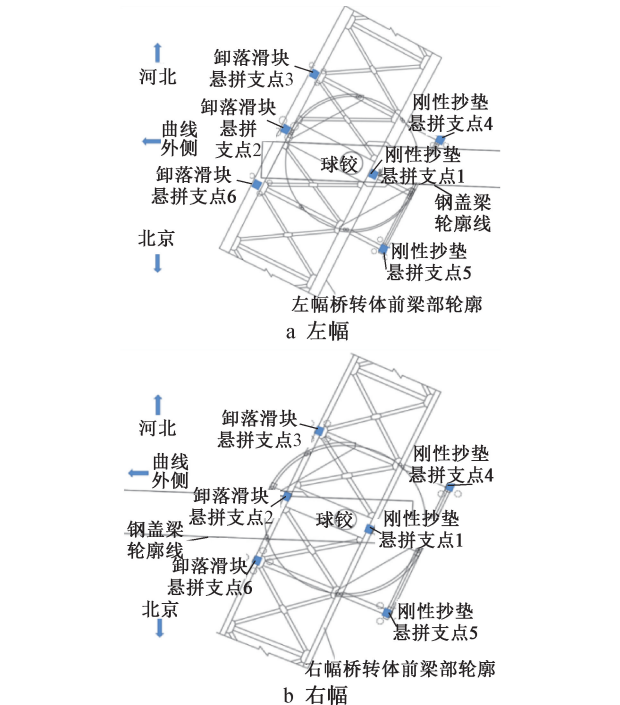


图 3 优化后悬拼支点平面布置
Fig. 3 Optimized plane layout of suspended fulcrum

卸落滑块装置由楔形块 1、2、3、挡座及顶推机构组成,如图 4 所示。楔形块 1 铺设于分配梁上,楔形块 3 设置在刚性抄垫下方,楔形块 2 的上下两个

斜面分别与楔形块 1、楔形块 3 的斜面紧密贴合;挡座与分配梁固定连接,顶推机构(选用千斤顶)安装于分配梁上,其伸缩端顶紧楔形块 2,通过控制楔形块 2 相对楔形块 1、楔形块 3 的滑动实现支点卸落。

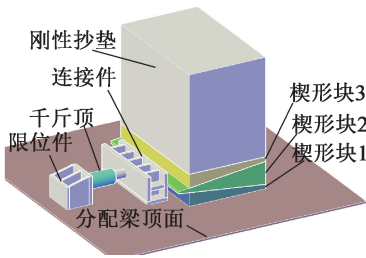


图 4 卸落滑块装置
Fig. 4 Unloading slider device

3.2 操作要点

体系转换采用分级卸载、精准控位、保险兜底的操作逻辑,确保受力转换平稳可控。

3.2.1 前置准备

左、右幅钢桁梁架设完毕后,严格按照设计要求及监控指令完成理论预配重作业,随后全面核查梁体线型、支点反力及悬拼临时墩脱空状态,待各项指标符合设计与监控要求后,即可启动体系转换施工。此阶段临时墩 1、2 与钢梁梁底处于脱空状态,左幅理论脱空高度 5cm,右幅理论脱空高度 4cm。体系转换前立面和平面如图 5、6 所示。

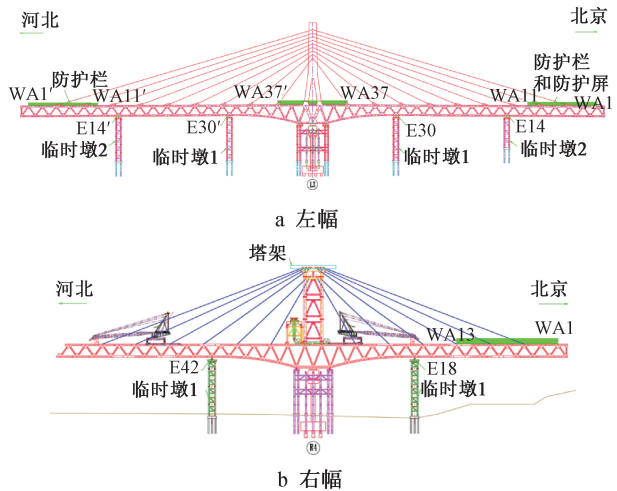


图 5 体系转换前立面
Fig. 5 Facade before system transformation

3.2.2 间隙管控

精准检测滑道与撑脚之间的间隙,确保撑脚处于设计脱空状态,具体脱空数值以监控指令为准。根据每日体系转换施工进度,在非作业时段及时采用铁楔将撑脚间隙塞紧,保障结构安全。

3.2.3 分级卸载

对曲线外侧悬拼支点 2 的滑块进行卸载作业,

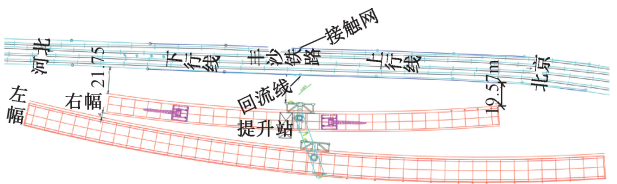


图 6 体系转换前平面
Fig. 6 Plane before system transformation

选用 2 台 100t 水平千斤顶,理论计算最大水平推力 452kN,最大卸落高度 35mm。卸载完成后,钢桁梁由球铰及悬拼支点 1、3、4、5、6 共同支撑。支点 2 卸落完毕后,立即通过 5t 倒链布设称重千斤顶,使其与梁底保持 2cm 间隙,做好后续施工准备。

依次卸落曲线外侧悬拼支点 3 和 6 的滑块,使曲线内侧悬拼支点 4 和 5 自然脱空。在支点完全拆除前,于各支点设计顶梁位置分别布设 1 台 1 000t 千斤顶作为保险墩,保持与梁底 2cm 间隙,非作业阶段采用铁楔塞紧间隙;支点完全拆除后,通过 5t 倒链调整千斤顶位置,确保其与梁底始终保持 2cm 间隙,此时钢梁仅由球铰及悬拼支点 1 支撑。

3.2.4 最终脱空

在悬拼支点 4 和 5 的设计顶梁位置各布置 1 台 1 000t 千斤顶(见图 7),每台千斤顶起顶力控制为 400t,使悬拼支点 1 实现脱空,随后拆除悬拼支点 1 的刚性抄垫,此时钢梁由球铰及千斤顶共同支撑。在 Z1 撑脚附近备用 1 台 1 000t 千斤顶,若支点 1 未能顺利脱空,可启用备用千斤顶辅助起顶脱空。悬拼支点 1 拆除后,拆除支点 4、5 的千斤顶,卸载起顶力,通过 5t 倒链布设称重千斤顶并保持与梁底 2cm 间隙,最终实现钢梁由球铰单独支撑的受力状态。

3.2.5 体系转换

所有悬拼支点完全脱空后,钢梁正式转换为球铰整体受力状态。实时观测撑脚与滑道之间的间隙,体系转换后理论脱空高度为 2cm,可根据监控指令采用不同厚度的 MGE 或四氟乙烯滑板调整间隙;若撑脚与滑道出现接触情况,可在称重配重阶段进行精准调整。经实测验证,体系转换各支点实测值与理论计算值偏差控制在 5%以内,满足设计要求。

3.3 称重与配重

体系转换完成后,结构转为球铰整体受力,需通过精准称重与配重调整结构重心,为墩顶转体的稳定性奠定基础,解决不平衡力矩、恶劣环境抗扰问题。

试验目的为精准测试转动体的不平衡力矩、偏心距、摩阻力矩及摩擦系数,进而调整结构重心位置。根据球铰摩阻力矩与转体结构偏心力矩相等

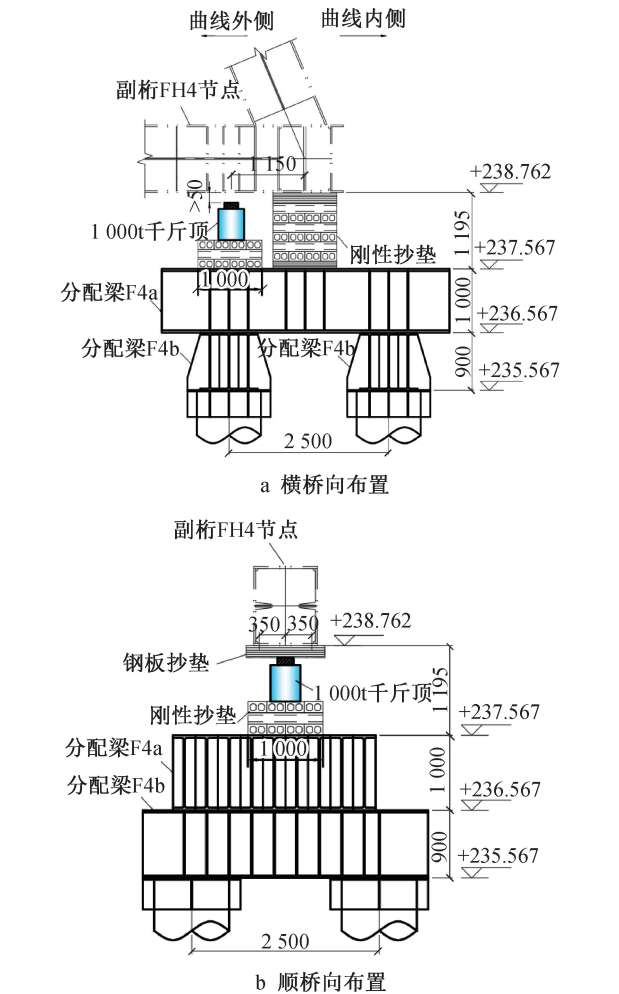


图 7 悬拼支点起顶千斤顶布置

Fig. 7 Layout of lifting jack of suspended fulcrum

的核心原则,经计算确定左右幅转体结构的千斤顶配置方案:左幅在悬拼支点处布置 6 台 1 000t 千斤顶作为正式称重设备,临时墩 1 布置 4 台 1 000t 千斤顶作为备用;右幅在悬拼支点处布置 6 台 500t 千

斤顶作为正式称重设备,临时墩 1 布置 4 台 500t 千斤顶作为备用。其中,悬拼支点处的称重千斤顶在体系转换阶段已完成布置,临时墩 1 上的备用称重千斤顶采用 80t 起重机配合 5t 倒链精准就位。临时墩 1 千斤顶的顶面高程,按撑脚与滑道刚好接触的工况进行设计确定。该工况下千斤顶承担双重功能:作为临时支点保障转体结构的平衡姿态;为转体称重试验提供稳定的顶升荷载。称重千斤顶平面布置如图 8 所示。

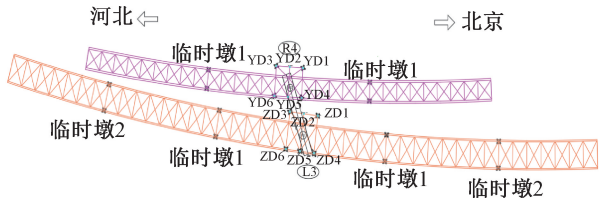


图 8 称重千斤顶平面布置
Fig. 8 Layout of weighing jack

结合桥址强风场及大悬臂曲梁的结构特性,优化称重配重转体姿态为 3 点支撑模式,由球铰与大里程侧两个撑脚(5 号、6 号)共同受力实现转体,其余撑脚保持脱空状态。该设计使撑脚受力明确,转体过程无晃动,稳定性显著提升。考虑到桥址位于山区河谷,转体施工时间为冬季 11 月底,常年阵风可达 6 级以上,为确保大跨度曲线钢桁梁墩顶转体的绝对稳定,本工程将转体重心顺桥向偏心距设计为 30cm(可抵御 8 级强风),远大于常规转体桥 5~15cm 的顺桥向偏心距设计标准,确保转体过程姿态平稳可控。转体前后撑脚布置平面如图 9 所示。

3.4 转体施工精准控制

左、右幅转体球铰均安装于钢盖梁上。为抵消曲线钢桁梁斜拉桥转体时的横桥向偏心影响,使转

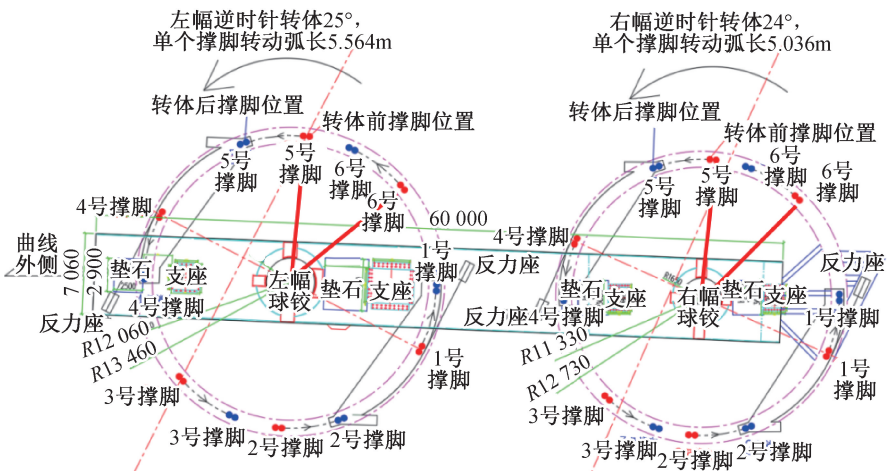


图 9 转体前后撑脚布置平面

Fig. 9 Layout plane of supporting feet before and after swivel

体重心基本重合于球铰中心,球铰安装时实际预设偏心距分别为 4.65m(左幅)和 2.7m(右幅)。墩顶转体的环形滑道体系沿盖梁圆周布设钢管柱支架,支架顶端设置分配梁,分配梁上方铺设混凝土滑道,左幅环形滑道直径为 25.52m,右幅环形滑道直径为 24.06m,每幅桥均设置 6 组撑脚。

转体系统与支撑体系均为柔性结构,墩顶高空转体的各向稳定性控制面临极大挑战。在不同环境因素、转体速度及结构偏心距的综合作用下,转体结构需承受较大的不平衡力矩。为解决这一难题,建立受力模型模拟转体各工况下的撑脚受力及环形滑道体系变形情况(见图 10),针对转体过程中刚度突变的关键部位进行结构补强,在滑道梁与盖梁交界处设置应力过渡装置,强化滑道梁与钢盖梁的刚性连接,有效消除柔性结构不均匀变形对转体的影响,确保转体姿态稳定,为墩顶转体提供可靠保障。

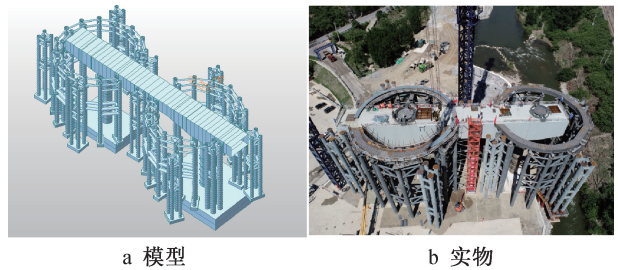


图 10 转体系统
Fig. 10 Rotation system

曲线钢桁梁完成称重、配重作业后,正式启动转体施工。左、右幅各配置 1 套 ZLD200 型液压同步自动连续牵引系统,通过形成水平旋转力偶,拽拉锚固于弧形转盘周围的钢绞线,驱动转体系统转动,完成转体施工。本工程采用“球铰+2 个撑脚”三点支撑转体受力方案,结合大偏心配重墩顶转体技术,双幅桥实际转体姿态稳定性控制达到预期效果:左幅实际启动牵引力 870kN(理论计算值 1 453kN),转动牵引力 430kN(理论计算值 871.8kN);右幅实际启动牵引力 560kN(理论计算值 800kN),转动牵引力 300kN(理论计算值 480kN),均优于设计预期。

双幅桥同步转体采用“角速度控制为主、线速度校核为辅”的策略,以 0.458 4°/min 的统一角速度控制:试转阶段通过“左幅先转 1°+ 双幅同步转 5°”确保正式转体角度一致;正式转体阶段(双幅均转 19°,用时 57min),接近设计位置 1m 时切换为手动点动操作,结合全站仪实时监测梁体高程与滑道状态,最终精准就位(双幅最小间距 11.89m)。正

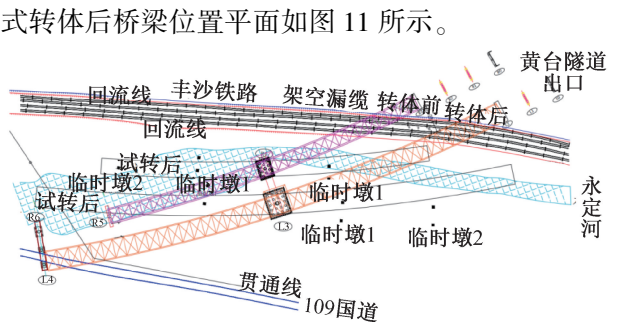


图 11 正式转体后桥梁位置平面
Fig. 11 Position plane of the bridge after the formal rotation

研发不同半径同角速度 PLC 控制系统,控制千斤顶行程差 $\leq 5\text{mm}$ 、角速度差 $\leq 1.2^\circ$,保障双幅同步精度;融合 BIM+北斗卫星定位技术,实时监测梁体俯仰角、横滚角及转动速度,联动线上模型与线下实体,同步监控梁体应力及支架沉降,实现施工全程安全可控。最终成桥效果如图 12 所示。



图 12 成桥效果
Fig. 12 Bridge effect

4 结语

本工程针对山区河谷柔性高墩墩顶曲线钢桁梁斜拉桥的施工核心难题,通过系列技术创新实现了全球首例双幅同步转体施工,该施工技术于 2023 年 11 月 28 日在国道 109 新线高速公路安家庄特大桥成功落地,验证了其在复杂山区河谷环境、大跨度曲线桥梁施工中的适用性与可靠性,为同类高难度桥梁施工提供了经验。

- 1) 首创应用大吨位滑块卸落刚性装置,成功替代传统大吨位砂箱,彻底解决了曲线钢桁梁拼装及体系转换过程中传统砂箱易产生的不均匀沉降难题。该装置操控便捷、精度可控,有效降低了体系转换阶段的安全风险,为同类工程提供了全新技术方案。
- 2) 体系转换卸落辅助工装相较于传统技术实现重大升级,可根据施工需求精准调节千斤顶伸长量,实现支点高度方向位移的精确控制。采用机械装置调控结构高度,大幅减少人为干扰因素,使体系转换过程更精准、更可控,提升了施工质量与效率。

3)创新采用曲线钢桁梁长悬臂、小间距、大偏心、柔性支架、双幅、高墩同一墩顶同步转体施工工艺,成功研发钢桁梁墩顶转体方法及装置、梁体偏心配重稳定转体方法,彻底破解了长悬臂曲线钢桁梁墩顶大偏心同步转体稳定性控制的难题。

4)融合 BIM、北斗定位及 PLC 控制技术,构建全流程监测与协同控制体系,保障了复杂环境下转体施工的精准度与安全性。

参考文献:

[1] 李艳明,徐升桥,彭岚平,等. 墩顶转体法施工的大跨度曲线钢桁梁桥总体设计及创新——以国道 109 新线高速公路安家庄特大桥主桥设计为例[J]. 铁道标准设计,2024,68(3): 1-7,55.

LI Y M,XU S Q,PENG L P,et al. Overall design and innovation of large-span curved steel truss bridges constructed using pier top rotation method—taking the design of the main bridge of anjiazhuang super major bridge on National Highway 109 New Line Expressway as an example[J]. Railway standard design, 2024,68(3):1-7,55.

[2] 金令,李辉,高静青,等. 京张高铁官厅水库特大桥总体设计及创新技术[J]. 铁道标准设计,2020,64(1):194-198,208.

JIN L,LI H,GAO J Q,et al. General design and innovation of extra-long bridge over Guanting Reservoir on jingzhang high-speed railway[J]. Railway standard design, 2020,64(1):194-198,208.

(上接第 96 页)

[16] 王晓刚. 碳纤维布加固锈蚀钢筋混凝土梁受弯性能研究[D]. 上海:同济大学,2008.

WANG X G. Study on bending performance of corroded reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber cloth[D]. Shanghai: Tongji University,2008.

[17] 苏幼坡,王兴国,宋晓胜,等. 钢筋混凝土框架梁拱效应的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(4):477-484.

SU Y P,WANG X G,SONG X S,et al. Experimental investigation on the arching action in reinforced concrete frame-beams[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition),2009,41(4):477-484.

[18] 林静聪,韩小雷,何子鸣,等. 考虑空间约束的钢筋混凝土连续梁受力性能研究[J]. 建筑结构学报,2025,46(9): 219-231.

LIN J C,HAN X L,HE Z M,et al. Study on mechanical

[3] 王春生,何文龙,寇婷苇. 公轨两用双层连续钢桁梁桥体系可靠度分析[J]. 中国公路学报,2024,37(10):73-84.

WANG C S,HE W L,KOU T W. System reliability analysis of rail-road double-deck continuous steel truss bridge[J]. China journal of highway and transport,2024,37(10):73-84.

[4] 刘郭周,傅中秋,李荫晓,等. 考虑双重非线性的大跨度钢桁梁拱桥稳定性能评估[J]. 施工技术(中英文),2024,53(12):52-57.

LIU G Z,FU Z Q,LI Y X,et al. Stability performance evaluation of long-span steel arch bridge with truss girder based on double nonlinearity[J]. Construction technology,2024,53(12):52-57.

[5] 甘国荣,李居泽,赖道辉,等. 大跨度斜拉桥拉索安装扭转控制技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(4):98-102.

GAN G R,LI J Z,LAI D H,et al. Torsion control technology of stay cable installation of long-span cable-stayed bridge[J]. Construction technology,2024,53(4):98-102.

[6] 盛建军,卢靖宇,严春明,等. 大跨度悬索桥桥塔横梁施工优化方法研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(23):74-79,108.

SHENG J J,LU J Y,YAN C M,et al. Construction optimization method of tower cross beam of long-span suspension bridge[J]. Construction technology,2023,52(23):74-79,108.

[7] 陈示光. 大跨度钢桁梁桥分段吊装技术[J]. 施工技术(中英文),2022,51(24):60-64.

CHEN S G. Segmental hoisting technology of long span steel truss bridge[J]. Construction technology,2022,51(24):60-64.

properties of reinforced concrete continuous beams incorporating spatial restraint[J]. Journal of building structures,2025,46(9): 219-231.

[19] 韩小雷,郑振光,梁晓敏,等. 考虑结构空间约束的现浇楼盖梁受剪性能试验研究[J]. 土木工程学报,2023,56(11): 16-26.

HAN X L,ZHENG Z G,LIANG X M,et al. Experimental study on shear performance of cast-in-situ floor beams incorporating structural spatial restraint[J]. China civil engineering journal, 2023,56(11):16-26.

[20] 韩小雷,郑振光,杨坚,等. 考虑结构空间约束的现浇楼盖梁跨中受弯性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(6): 61-71.

HAN X L,ZHENG Z G,YANG J,et al. Experimental study on mid-span flexural performance of floor beams incorporating structural spatial restraints[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2024,56(6):61-71.