

大跨度钢桥顶推施工关键技术优化与控制体系研究

舒海斌

宁海县建筑工程质量安全监督站 浙江 宁波 315600

摘要: 本文以宁东新城下徐溪桥130m主跨、总重逾3300吨钢桥顶推施工为背景,系统阐述了其钢结构顶推核心技术体系。结合专家组意见,从结构协同设计与验算、地基与临时结构设计、智能顶推系统、落梁与吊杆张拉、施工监测与风控等方面对原方案开展深化研究。综合采用步履式智能顶推、大吨位异形构件吊装、BIM模拟与实时监测等技术,形成了覆盖“设计-施工-监测”全过程的精细化控制体系。工程实践表明,该研究成果可为大跨度钢结构桥梁顶推施工提供可靠的技术范本与安全管理经验,具有重要的推广参考价值。

关键词: 下承式拱梁组合; 钢结构顶推; 步履式; 临时结构稳定性; 监测

引言

顶推法施工是将桥梁上部结构在桥台后方拼装平台分段预制,通过墩顶顶推设备及滑道逐段顶推就位的关键工法,其技术核心在于平衡施工期临时结构与永久结构受力,实现长距离、大吨位构件精确移位。该工法无需大型浮吊跨越通航河道、深谷等敏感区域,对桥下干扰小、安全性高,在现代桥梁建设中应用广泛。但随着跨径增大、结构复杂化,顶推施工面临临时支撑体系复杂、同步控制精度要求高、环境荷载(风、温度)敏感、安全风险集聚等多重挑战,其中大吨位大悬臂状态下的结构受力转换、多点同步顶推精度控制、临时结构稳定性保障及复杂环境下抗风安全^[1],成为制约工程成败的关键因素。

宁东新城下徐溪桥主桥为跨径25+80+25m的下承式拱梁组合体系拱桥,主梁(2326吨)与钢拱(1017.3吨)均采用钢结构,桥址位于滨海软土区,水文地质条件复杂。该桥具有结构新颖、自重重大、施工环境敏感等特点,顶推施工难度在国内同类型桥梁中亦属罕见。为应对上述挑战,在原专项施工方案^[2]基础上,结合多方面意见,对结构协同设计、局部构造、监控体系及抗风稳定性等方面进行系统性优化与提升,旨在形成一套科学、精细、可靠的顶推施工技术体系,为类似工程提供高阶技术参考。

1 工程概况与核心施工难点

1.1 工程概况

下徐溪桥主桥为下承式拱梁组合体系拱桥,结构体系复杂。主梁采用双主梁(箱式系梁)与横梁结合的开口钢箱梁结构,桥面全宽40.5m,设双向2%横坡;系梁宽4.8m、净距22m,梁高在主跨及吊索范围内为2.0m,桥墩处加高至2.5m。拱肋为全焊六边形钢箱截面,两片拱肋横向内倾13.616°,立面由直线段与圆弧段构成,理论矢高45m。吊杆全桥共设8对,纵向间距7.5m,采用73Φ7平

行钢丝绳,下端锚固于主梁钢箱内。桥址区属滨海相沉积平原,地层自上而下分布素填土、淤泥质粘土、圆砾、强风化岩等,地下水埋深0.5~2.6m,河床受上游水库泄洪影响水位变幅较大,对基础设计与临时结构稳定性提出严峻考验。

1.2 核心施工技术难点

结构与临时体系协同受力复杂:顶推过程中,钢导梁长24m,最大悬臂达25m。主体结构与临时支撑(钢管柱支架、步履顶)的相互作用力呈显著时变特性,各支点反力随顶推位置动态变化,最大单点支反力达1983.6kN。需精细验算各工况下主体结构的应力分布及临时结构的整体稳定性^[3],防止局部失稳或破坏。

软土地基上重型临时结构稳定性:履带吊(最大接地比压约260kPa)、拱肋支架及顶推临时墩均坐落于高压缩性淤泥质黏土层。地基在施工扰动下易产生沉降,负摩擦效应可能降低桩基承载力。需对地基进行专门处理,并严格控制沉降量,确保重型机械和临时结构的安全。

大钢梁最重节段达76吨,拱肋节段最大72吨,需采用400t汽车吊进行双机抬吊。构件重心计算、吊点布置、空中姿态调整及精准对位难度大,对吊装指挥、设备性能及吊具安全系数要求极高。

顶推过程多目标同步控制:需同时控制竖向顶升同步(精度 $\leq 4\text{mm}$)、纵向顶推同步(墩间位移差 $\leq 5\text{mm}$)、横向纠偏(轴线偏差 $\leq 5\text{cm}$ 内自动调节)及线形(竖曲线拟合)。任何一项失控都可能导致结构内力异常或顶推失败。

精度要求高:成桥线形需满足设计竖曲线与预拱度要求^[4],钢梁对接焊缝错边量、拱肋合拢误差、吊杆张拉力偏差等均需严格控制在规范允许范围内。测量与控制精度直接影响结构最终内力与外观质量。

环境敏感性高：桥址区受季风及台风影响，施工阶段结构风致响应显著；昼夜温差引起的钢梁伸缩对顶推设备产生附加水平力，可能造成临时结构超载或顶推卡阻。

2 关键施工技术及优化

2.1 结构协同设计与验算深化

钢结构分段吊装与设计复核：基于运输限制、吊机能力及结构受力，采用精细化BIM模型将钢梁划分为箱式系梁、挑臂、横梁等共131个节段，拱肋划分为18个节段，并明确各节段吊点位置及吊耳规格。将分段方案及施工工况（包括吊装荷载、顶推支点反力、临时约束）正式提交桥梁设计单位进行复核，重点验算拱梁结合段、吊索锚固区在拼装、顶推、落梁阶段的局部应力，确保在最不利工况下Q345QD钢材的应力水平不超过容许值，并针对应力集中区域提出加强构造措施。

钢柱承载力与稳定性复核验算：在原轴压验算基础上，根据规范计入淤泥质黏土层因排水固结产生的负摩阻力影响，修正了顶推临时墩钢管桩的竖向承载力设计值；采用有限元软件对顶推临时墩钢管桩进行屈曲分析，考虑各组合工况。验算结果表明，在最不利风向作用下，钢管柱整体稳定系数满足规范要求^[5]，同时，对柱脚与基础连接焊缝进行抗剪验算，确保连接可靠。

3 地基与临时结构设计优化

地基处理精细化：履带吊地基明确的标准化做法，补充换填后地基土的平板载荷试验检测方案；对河内 $\phi 800$ 钢管桩，控制打桩速率，严格遵循“慢速、间隔”的原则，在原有地质勘察报告基础上，补充了试桩方案，通过静载试验确定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求，并明确停锤控制标准，确保桩端进入持力层足够深度。

临时结构连接与拆除工艺优化：拱肋分段投影处布设 $\phi 320$ 钢管桩群，支架柱脚与预埋钢板连接采用二级焊缝，并增设抗剪键以抵抗安装过程中可能出现的水平力。临时支架拆除前，利用全站仪对结构状态进行全面复核，确认无应力约束后，严格按“先拆连接系、后分节吊除柱段”的逆序进行作业，吊除过程中采用缆风绳辅助稳定，防止碰撞。

4 智能顶推系统应用与工艺改进

步履式智能顶推系统应用：该系统集竖向顶升、纵向顶推和横向纠偏功能于一体，通过液压系统与PLC电控系统实现自动化、同步化作业，控制系统采用主从站网络架构，主控制器根据各墩位移传感器反馈实时调节比例阀开度，实现闭环控制。优化了顶推泵站至各千斤顶的油路布置，采用环形主油路与星形分支相结合的方式，提高供油稳定性。对钢垫梁在最大支反力下的抗倾覆与抗滑

移进行验算，顶推过程中，系统自动记录各点荷载与位移，偏差超限时自动停机报警。

变截面区段顶推工艺：针对中墩横梁处梁高变化（2.0m渐变至2.5m），制定了专项“阶梯形抄垫工艺”。通过预制的不同厚度钢垫板进行组合，确保顶推滑移面在变截面区段平稳过渡。设计时对垫板进行了抗弯强度与局部承压验算，保证在最不利荷载下不发生屈服。顶推至变截面区域时，将顶推速度降低至2m/h，并加密测量梁底标高与垫板接触情况，及时调整垫板组合。

5 落梁与吊杆张拉工艺及优化

落梁工艺及优化设计：顶推到位后，采用“分级位移控制+三升一降”循环工艺进行落梁。通过MIDAS Civil建立落梁全过程仿真模型，动态模拟结构从多点支撑向永久支座转换过程中的内力重分布，据此制定分区分级的落梁顺序，将总落梁高度划分为若干控制阶段，步距与同步误差按阶段分级控制。落梁过程中实时采集各千斤顶荷载与梁体标高，与仿真值对比，偏差超限时暂停调整。每组步履顶旁设机械螺旋锁死装置，与液压保压系统形成双重保障，应对突发失压风险。

吊杆张拉工艺优化：全桥8对73 $\Phi 7$ 平行钢丝索采用YCW150B千斤顶张拉。张拉前，监控单位通过MIDAS模型生成《动态张拉指令表》，明确顺序、分级荷载及理论变形值。张拉过程实施“索力（压力环+油压表）-线形（自动全站仪）-应力（振弦应变计）”三同步监测，实测索力或拱肋变形偏差将自动暂停并修正。将实时监测数据入库，用于修正和完善桥梁结构的施工仿真计算模型，为后续同类工程提供数据支撑。

6 施工监测与风控措施体系化

全过程监测方案升级：在原有测量控制网基础上，增加了基于全站仪的自动跟踪测量系统，对顶推过程中梁体轴线、关键点标高进行实时采集。同时在钢箱梁关键截面（如最大悬臂根部、跨中）和临时支撑钢管柱上布设振弦式应变计，实时监测施工应力，并与MIDAS/Civil施工阶段分析模型结果进行对比预警。当监测数据超过预设阈值时，系统自动推送报警信息至现场管理人员，并建议采取纠偏或暂停措施^[6]。

专项风致响应分析与措施：针对最大悬臂及合龙前钢箱梁与拱肋，计算了10m/s和15m/s风速下的静风荷载，并评估了该荷载对立柱稳定性及顶推同步性的影响。分析表明，当风速达到15m/s时，风荷载引起的顶推力增量约为摩擦力的8%，对同步性影响较小，但对未形成稳定体系的拱肋节段可能产生显著位移。据此制定大风应对规程：风速 ≥ 6 级时停止高空吊装与顶推作业；未连横

撑的拱肋节段加设缆风绳；顶推设备控制程序中加入风荷载补偿算法，当风速传感器实测值超过阈值时，系统自动调整顶推力分配以抵消风载影响。

7 实施效果与验证

经上述优化后的方案付诸实施，取得了显著成效：

结构安全可控：施工全过程应力监测数据显示，主体结构与临时支撑柱最大应力均低于设计容许值，且与仿真结果吻合良好，最大偏差控制在合理范围内。顶推过程中各支点反力波动幅度小，未出现异常突变。

施工精度优异：顶推全程轴线和梁底标高误差控制均优于规范要求，成桥线形精准契合设计竖曲线。拱肋合拢段误差控制良好，吊杆最终索力偏差满足设计要求。

风险有效规避：在两次台风外围影响期间，提前启动抗风预案，结构无异常振动、临时设施无损坏，实现零伤亡零事故。经应急演练验证，预案响应迅速有效。

工效显著提升：顶推分段与同步控制优化后，使平均顶推速度达到5m/h，较计划提前12天完成主体结构就位。吊杆张拉总耗时比传统工艺缩短30%，综合节约工期约20天。

8 结论

通过对本桥顶推方案的深度优化，形成了一套更为科学与稳健的大跨度钢桥顶推施工技术体系。主要结论与创新点如下：

提出了“动态设计协同”理念，将施工工况作为特殊荷载组合纳入结构设计复核，确保了施工期结构安全，避免了传统设计施工脱节问题。

建立了“地-临-永”一体化验算模型，综合考虑了软土负摩阻、风-顶推组合等复杂因素，提高了临时结构设计的可靠性，填补了常规验算的盲区。

构建了“监测-分析-调控”的实时反馈控制闭环系统，以自动化数据驱动施工决策与风险预警，实现了从经验管理向数字化管控的转变。

形成了基于特定风险的精细化应急预案，使应急响应从通用性向针对性转变，提升了突发状况的处置效率，为行业安全管理提供了范例。

本工程实践表明，大型桥梁顶推施工的专项方案，既需全面的初始设计，更离不开基于实践的持续优化。这套融合先进技术、精细管理与动态控制的方法，为推动我国大跨度钢结构桥梁顶推技术的标准化与智能化发展，提供了可复制的范本，具有重要的工程应用价值与推广前景。

参考文献

- [1]项海帆,等.现代桥梁抗风理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2]宁波市政集团.下徐溪桥钢结构顶推专项施工方案(优化版)[R].2024.
- [3]周绪红,等.钢结构稳定理论与设计[M].北京:科学出版社,2019.
- [4]GB50205-2020,钢结构工程施工质量验收标准[S].
- [5]JTG/T3650-2020,公路桥涵施工技术规范[S].
- [6]中华人民共和国住房和城乡建设部.危险性较大的分部分项工程安全管理规定:住建部令第37号[Z].2018.