

斜交大跨钢桁架梁顶推施工工艺技术研究

胡连超¹ 周顺善² 钱宇航¹ 杨作杰¹ 张军锋³

1 中国建筑第七工程局有限公司 河南郑州 450000;

2 温州市城市基础设施建设投资有限公司 浙江温州 325000; 3 郑州大学 河南郑州 450000

DOI:10.12238/ems.v7i6.13886

[摘要] 随着国内高速公路路网密度的持续增长和交通流量的急剧增加,桥梁跨越既有高速公路的施工需求日益增多。传统跨线桥梁施工方法已无法满足新时代交通干线的建设需求。特别是在既有高速公路大流量、不间断运营状态下实施斜交、大跨钢桁架梁架设工程,面临着交通组织复杂、安全风险高、施工周期长等诸多技术难题。顶推施工技术作为一种现代化桥梁建造方法,因其对既有交通影响小、施工精度高、安全可控性强等特点,逐渐成为跨越繁忙交通干线工程的首选方案。

[关键词] 斜交大跨钢桁架; 架设工程; 施工技术

1 引言

温州轨道交通 S3 线附属配套工程项目主线高架与甬台温高速立体呈 45° 交叉。其中上跨高速主桥上部结构采用 105m 下承式简支钢桁梁。中建七局以该工程实践为依托,联合业主单位组织成立科技攻关小组,针对跨高速 105m 钢桁架梁施工特殊工况开展系统研究。针对临时支墩与桁架梁呈 45° 斜交或垂直两种不同布置形式,比选出最优布置方案;创新采用反力架形式对临时支墩进行预压加载,解决了场地狭小、支墩基础无法堆载预压难题;创新采用“负重前行”的步履式顶推工艺,解决了高速路中间设临时支墩、断行减流的难题,攻克了复杂线形条件下的同步性控制关键技术,达到了 2400t 多点同步顶推、同步纠偏、高精度控制的效果。

2. 工法特点

一是交通影响小,施工期间不封高速,利用顶推窗口期作业;二是可调精度高,设备可实时调整顶推姿态,避免结构受力不均;三是经济效益可观,减少占道断流及相关费用;

四是适应性广,适用于大跨度、曲线或直线钢桁架梁桥;五是绿色环保,减少大型设备使用,降低污染。

3. 工艺原理

施工高速周边临时支墩钢管桩基础,采用反力架形式对临时支墩进行预压加载,并同步施工其他区域的扩大基础;搭设基础上方临时支墩,在临时支墩上安装步履式顶推设备和临时钢垫梁;钢桁架单元构件运输至施工现场采用履带吊吊装至临时支墩拼装平台上,将单元构件自下而上通过高强螺栓及焊接的方式拼装成整体;吊装高速正上方预制桥面板,并做好周边临时防护;采用多台步履式顶推设备通过“顶升-平移-回落”循环动作逐步顶推至设计位置;最后通过落梁垫块与步履机的配合,采用逐块抽取钢垫板方式进行整联缓慢落梁,将钢桁架梁落至设计永久支座位置,完成体系转换完成整体落梁就位。

4. 施工工艺流程及操作要点

4.1 工艺流程

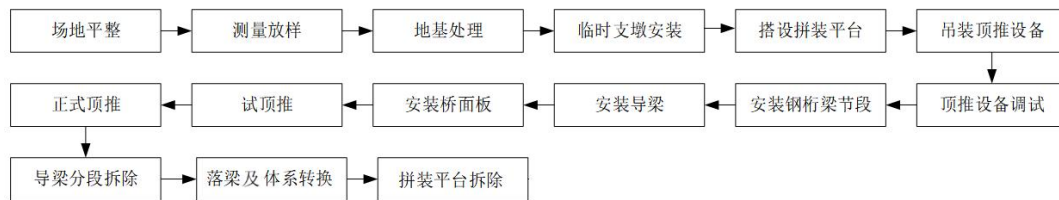


图1 钢桁梁施工总体流程图

4.2 关键操作要点

4.2.1 地基处理

临时支墩分 2 种形式,其中高速两侧临时支墩(A8/A9/B9/B10)最大受力 570.6t,采用 720t 顶推设备,下部采用 d820 桩基础,入土深度 50m。其余临时支墩最大受力 322.8t,采用 400t 顶推设备,地基换填处理后采用扩大基础。

(1) 基础换填

履带吊站位区以及扩大基础要求地基承载力 $\geq 150\text{Kpa}$,采用换填清宕渣、分层碾压整平处理;并选取代表性位置做浅层平板载荷试验,分级加载记录数据。

(2) 钢管桩施工

钢管桩采用打拔机进行施打;第一节钢管桩沉至桩顶高

出地面 60~80cm 时,停止振动,进行接桩;在钢管桩对接接头处增加加劲板,加劲板宽度为 300mm,厚 10mm;用全站仪校好垂直度,再行点焊;焊接采用多层焊、对称进行,各层焊缝接头应错开,焊渣应每层清除。

钢管桩施工到位后,采用反力架进行加载预压,预压重量按拼装过程及顶推过程最不利受力工况下受力状态进行预压,反力架千斤顶配备百分表,分级记录预压值及变形量。

4.2.2. 临时支墩施工

采用 C30 钢筋砼,基础尺寸 $7.0\times 5.0\times 0.75\text{m}$ 。基础预埋件采用 $\Phi 700\times 14\text{mm}$ 和 $\Phi 1000\times 14\text{mm}$ 厚钢板及 $\Phi 16$ 的圆钢,圆钢需与基钢筋焊接牢靠,支架钢管底部与预埋钢板之间采用全焊接连接固定,焊缝高度不小于 10mm。

4.2.3. 搭设拼装平台

顶推临时支架采用 2 列，单列 2 根立柱的格构式结构，两根立柱钢管之间横联采用焊接钢管连接，立柱与横联材质均为 Q235B；纵、横向分配梁均采用双拼 H700×300 热轧 H 型钢，材质为 Q345。

首先根据设计图纸，标明立柱与横杆、斜杆的交叉节点位置，安装过程需严格控制垂直度，垂直度不得大于高度的 1/500 且不得大于 5cm；对横杆、斜杆下料，与立柱相贯线连接，采用气体保护焊工艺与立柱焊接，形成格构体系，所有焊缝需达到与母材等强的要求；纵横分配梁施工时，先在陆地上拼接，形成整体后用吊车配合人工安放于钢管桩顶部，对正中心，摆放到位，接触处采用焊接。

4.2.4. 吊装顶推设备

(1) 顶推装备选型

单幅桁架重量约 1870t，顶推时考虑带跨高速顶部混凝土桥面板 66 块，约 350t。前导梁长度约 57.3m，重量约 200t，后导梁长度约 10.8m，重量约 30t，顶推总重量约为 2400t。

综合考虑，结合本桥结构形式，施工时采用平推式顶推设备进行施工，单幅桁架顶推共设置 20 台顶推设备，其中靠近高速位置 4 台为 BL720，其余为 BL400。步履式顶推设备集顶升、平推及横向调整于一体，能够进行横桥向及竖向的调整。在顶推施工过程中，通过调整顺桥向及横桥向导向调整油缸、顶升支撑油缸的行程，计算机控制系统能够自动纠偏，保证桥梁中线在允许范围之内。

表 1 顶推设备性能参数

序号	设备 形号	油缸 名称	油缸 数量 (个)	油缸 缸径 (mm)	活塞 杆径 (mm)	油缸 高度 (mm)	油缸 行程 (mm)	额定载荷 (T)	额定 油压 (MPa)	换算 关系 (T/MPa)	外观尺寸 (L*W*H) (mm)
1	400 型	顶升油缸	2	Ø380	Ø254	580	150	200	27	7.5	2540*1404* 1200
		平推油缸	1	Ø220	Ø126	980	310	60	25	2.4	
		导向油缸	4	Ø170	Ø80	270	55	20	25	0.8	
2	720 型	顶升油缸	4	Ø310	Ø270	612	250	180	25	7.5	2950*1500 *1145
		平推油缸	2	Ø170	Ø100	540	350	70	30	2.3	
		导向油缸	4	Ø150	Ø100	270	55	40	25	1.8	

(2) 设备吊装

平推式顶推系统主要包括上部滑移结构、顶升支撑竖向油缸、垫块、顶推移动水平油缸、横向调整油缸、下部滑移底座结构。在地面整体组装完成后采用吊车配合人工方式按设计位置固定安放于临时支墩格构柱顶部横梁上方。

4.2.5. 顶推设备调试

顶推系统使用前，应进行整体调试和演练，确保顶推过程中所有油缸、泵站、油路、传感器、控制系统的正常运行。

4.2.6. 安装钢桁梁节段

(1) 吊装设备选型

根据设计分段划分，最重分段重约 71.5t，最大吊装高度约 25m，结合现场实际环境、吊车作业半径等因素，选择采用 1 台 SCC3500A-6 履带式起重机，其起重能力、作业半径满足该项目现场的安装需求。

(2) 梁段划分

钢桁梁为单跨简支结构 105m 跨径，上下弦杆纵向分为 5 个节段；连接下弦杆中间横梁设计尺寸最大为 11.3m，满足道路运输要求，且所有横梁与纵梁均采用螺栓连接，道路运输水平放置容易产生变形；按照设计意图横梁及纵梁不再进行划分，按照单元件单根运输。

(3) 节段吊装

在节段吊装环节，需严格把控施工流程与精度。首先对拼装平台的标高、线型及位置进行测量复核，确保基础精准；随后完成桁架节段上下弦杆的定位工作；连接端口处采用现场连接板固定，利用工装销轴和安装螺栓紧固螺栓孔；最后依次吊装上下弦腹杆，定位时着重控制腹杆中心线与节点板中心的吻合度，同时保障腹杆与主桁节点板间的配合间隙符合标准。

(4) 高强螺栓螺栓施拧

腹杆与上下弦杆及上下平联采用高强度螺栓连接，为保障节点螺栓精度，构件一半螺栓孔于预拼时配钻，且螺栓孔配钻与高强度螺栓施工均严格遵循工艺规范：施工前，按出厂批号复验高强度大六角头螺栓连接副扭矩系数，确保其平均值处于 0.11-0.15 区间，标准偏差超 0.01，并符合图纸要求；同时检查连接板摩擦面抗滑移系数是否达标，标定力矩扳手以满足拧紧需求。安装时，清除构件飞边、毛刺，保证摩擦面干燥洁净，避免雨中作业，使用长锥形冲钉穿入螺栓，严禁采用绞刀扩孔。

高强度螺栓连接安装时，在每个节点穿入的临时螺栓和冲钉数量，由安装时可能承担的荷载计算确定，并满足下列规定：不得少于安装总数的 1/3；不得少于两个临时螺栓；冲钉穿入数量不宜多于临时螺栓的 30%；不得用高强度螺栓兼做临时螺栓，以防损伤螺纹引起扭矩系数的变化；高强度螺栓的安装应在结构构件中心位置调整后，其穿入方向以施工方便为准，并力求一致；高强度螺栓的拧紧分为初拧、复拧、终拧，拧紧时均需采用扭矩扳手。

(5) 节段拼装监控量测

钢桁架梁安装过程中线型控制的相关监测内容：控制点、高程点的加密→支线的、高程的复测→支撑垫石复测→球形支座安装测量→支撑体系安装测量控制及沉降观测→钢桁架安装测量控制；每联钢桁架安装按 10m 设一个测量点，每个测量点测量次数为三次。

4.2.7. 安装导梁

前导梁长 57.28m，后导梁长 10.82m，高度均由 11.374m 渐变至 6.9m，导梁上下弦杆以及腹杆均采用矩形方钢，横向连杆及剪刀撑均采用焊接钢管。

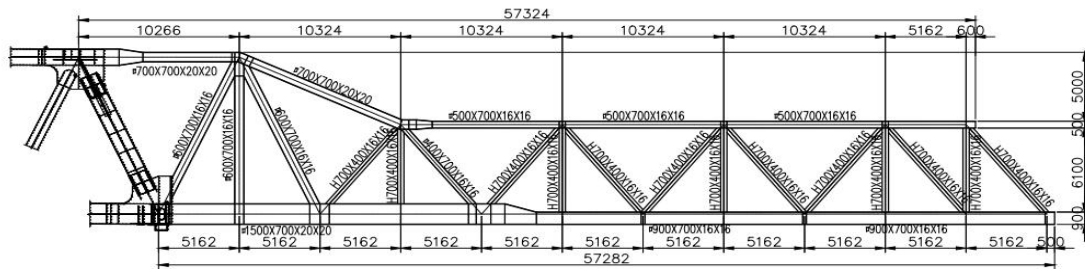


图2 前后导梁结构细部图

前后导梁与桁架采用焊接连接,导梁安装采取上下弦杆在地面先各自形成整体,分开吊装;下弦杆吊装定位焊接完成后,进行导梁腹杆安装,最后进行导梁上弦杆安装;导梁左右幅之间的横联与腹杆焊接连接,形成整体吊装。

4.2.8. 安装桥面板

根据桥面板尺寸在每条纵横梁上放出纵横梁方向中心线、桥面板端头横线；涂刷环氧树脂砂浆，然后将橡胶条粘贴在钢桁梁纵横梁上；使用吊车纵向一端向另一端，横向梁板往中间依次吊装桥面预制板，按照放样位置定位，为防止橡胶条定位不准或预制梁板吊装破坏橡胶条，边吊装边安装橡胶条；桥面板安装定位后，及时焊接相邻板间的钢筋。

4.2.9. 试顶推

试顶推施工需严格遵循规范流程。顶推前,对顶推油缸、液压泵站、计算机控制系统等设备设施及应急措施进行全面检查并形成报告;加载试验时,按 20%、40%、60%、80%、100%的顺序对每个顶升点逐级加载,同步记录各点变形等参数。加载完成后,由计算机控制开展升降试验,观察顶升支撑油缸的同步性。试验结束后,依据记录分析数据并评估结果,核查数据是否符合设计要求,超范围时及时分析改进。试顶推全程实时监控各点位置与负载参数,观察同步控制情况并按需调整参数,试顶推距离设定为一个行程。

4.2.10. 正式顶推

(1) 顶推工艺介绍

步骤 1、竖向油缸顶升，钢桁架梁脱空；步骤 2、纵移油缸加载，多台设备同步向前推动钢桁架梁纵移，横向纠偏油缸根据要求纠偏；步骤 3、纵移油缸到位，竖向油缸下降，钢桁架梁落到支架分配梁上；步骤 4、顶升油缸继续下降，设备滑移梁与钢桁架梁脱开，纵移油缸空载回程；步骤 5、纵移油缸回到初始位置，循环执行第一步直至将主梁送到设计位置。

(2) 顶推施工监控要点

顶推施工监控需精准把控多个关键点。施工前,依据工况支点反力估算摩擦力,并与油压表数据相互验证;顶推过程中,若顶推力骤升,须立即停止作业,着重检查顶推设备支撑架与滑移面。位移观测方面,实时监测梁体中线偏移及墩顶水平、竖向位移,超设计允许偏位时,及时用千斤顶调整。主控台根据摩阻大小自动调节顶推力,并通过油表反馈。顶推至最后梁段时,选择温度稳定的夜间,按监控指令推至最终位置,结合温度计算测定梁长。每轮次最后一段梁

及最后一轮顶推时，放缓速度，确保纠偏与纵移精准到位。

4.2.11. 导梁分段拆除

根据顶推工况, 钢导梁拆除分为两个阶段。第一阶段为顶推钢导梁过 A9/B10 临时墩后 36m 后, 钢导梁悬臂太长, 导致钢桁梁应力变形过大, 因此拆除钢导梁前半截约 25.7m~25.8m; 第二阶段为钢桁梁顶推到位后, 通过各结构墩上的竖向千斤顶对钢桁梁纵向线形进行调整, 最后钢桁梁落梁, 完成钢桁梁的安装与顶推施工, 拆除前后导梁。钢导梁拆除采用钢桁梁吊装履带吊进行吊装拆除, 钢导梁与钢桁梁连接处采用火焰切割割除后, 人工砂轮机磨平。

4.2.12. 落梁及体系转换

顶推到位后开始进行落梁施工，落梁最大高度 1464mm，通过落梁垫块与步履机的配合，将钢桁梁落至设计位置。落梁方式采用整联落梁，重量重，在落梁前需要做好测量工作；落梁时因注意采用逐块抽取钢垫板方式进行应急保护，落梁过程中进行钢桁梁与各支座高差监控。落梁流程：

4.2.13. 拼装平台拆除

临时支撑应在钢梁落梁后,报检合格后方可进行拆除,拆除时应清除周围的障碍物。钢梁顶推出顶推墩后、顶推设备采用 25t 汽车吊进行拆除、先吊装拆除搁置梁、及顶推设备、在吊装拆除设备底座、最后汽车吊将型钢分配梁吊住、切割下部钢管。切割完成后将钢管分配梁一起装车运至空地三件拆除、

5. 质量控制要点

钢桁梁顶推施工的质量控制要点明确且全面。在指标控制上,钢梁节段制造尺寸偏差需 $\leq L/3000$,顶推轴线偏位 $\leq 10\text{mm}$,临时支墩沉降量 $\leq 2\text{mm}/24\text{h}$ 。施工监控工作重点围绕多方面展开,包括对钢桁梁桥面线形、轴向偏位、关键断面应力,导梁前端挠度、关键断面应力的监测分析,同时也涵盖拼装与顶推支架施工变形,以及临时支墩变形的监测,以此保障施工质量。

6. 结语

综上所述,针对跨高速 105m 钢桁架梁施工难题,本工法通过创新临时支墩布置与预压方式,采用“负重前行”步履式顶推工艺,成功克服交通组织、安全风险等挑战。施工中严格把控各环节操作要点与质量标准,实现了 2400t 多点同步顶推的高精度控制。该工法在温州轨道交通 S3 线项目的成功应用,为同类大跨钢桁架梁跨越繁忙交通干线工程提供了可靠范例与技术参考。