

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.04.016

场地环境限制下城市高架钢箱梁桥顶推 关键施工技术与分析

徐士征¹, 程谦勇², 王静峰², 叶圣彬³, 沈奇罕², 孙百川³

(1. 安徽建工路港建设集团有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 合肥市重点工程建设管理局, 安徽 合肥 230051)

摘要:随着国家城市快速发展,城市更新升级势在必行。高架桥梁作为城市交通发展的主要代表之一,其更新升级面临的场地环境限制问题突出。为探究在场地环境限制下的城市高架桥梁顶推关键施工技术,文章依托合肥市文忠路高架桥快速路项目,基于其紧邻运营地铁和城市主干道现状,系统设计研究了钢箱梁顶推,规范了顶推方案、顶推动力系统、导梁和支撑系统、滑动系统、控制系统的基本设计原则。建立考虑场地环境限制影响的钢箱梁顶推施工数值分析模型,明确顶推施工最不利工况。开展钢箱梁顶推施工监测分析,确立了关键监测点布置原则和关键步骤。该研究旨在为场地环境限制下的城市高架桥梁建设提供了科学支撑和实践依据。

关键词:城市桥梁;钢箱梁;顶推施工;施工设计;数值模拟;施工监控

中图分类号:TU997 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)04-0547-10

Critical construction technology and analysis of steel box girder jacking for urban viaducts under site environmental constraints

XU Shizheng¹, CHENG Qianyong², WANG Jingfeng²,
YE Shengbin³, SHEN Qihan², SUN Baichuan³

(1. Anhui Construction Engineering Road Port Construction Group Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Hefei Key Project Construction Administration, Hefei 230051, China)

Abstract: With the rapid urban development in China, urban renewal and upgrading have become essential. As an important part of the urban transportation network, urban viaducts encounter pronounced challenges due to site environmental constraints during their renewal and upgrading. Aiming at investigating the critical jacking construction technology for urban viaducts under site environmental constraints, based on the construction of Hefei Wenzhong Road Viaduct Project, and taking into account its proximity to operating subway and urban arterial roads, this paper systematically designs and analyzes the steel box girder jacking. It establishes fundamental design principles for the jacking scheme as well as jacking force system, guide beam and support system, sliding system, and control system. A numerical analysis model for the steel box girder jacking construction under site environmental constraints is developed to identify the most unfavorable construction conditions. Furthermore, the construction monitoring is performed to define the principles for arranging key monitoring points and to outline the critical procedures. The research can provide theoretical basis and practical

收稿日期:2023-11-27;修回日期:2024-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278170)

作者简介:徐士征(1978—),男,安徽萧县人,安徽建工路港建设集团有限公司高级工程师;

王静峰(1976—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:jfwang008@163.com.

reference for the construction of urban viaducts under site environmental constraints.

Key words: urban bridge; steel box girder; jacking construction; construction design; numerical simulation; construction monitoring

0 引 言

2019 年和 2021 年中共中央、国务院先后印发《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》，明确提出到 2035 年基本建成交通强国^[1]。高架快速路因充分利用城市空间、增加路网容量、强化快速干线的交通功能和交通分流、提高车速、提高通行能力和运输效率、建设周期短、成本低、见效快、节约用地、对减少自然环境的破坏等优点，对沟通城市中心与边缘乃至卫星城市、优化区域交通网结构、提高道路的通行能力及舒适性、改善当地居民的出行环境、促进区域的经济的发展有着重要作用^[2]。伴随着城市道路和交通工程的快速发展，我国大部分城市中心城区陆续出现道路红线资源有限、建筑密集、建设条件受限等问题，地铁、快速路和铁路等线路交叉、重叠建设等情况愈发常见，引发了诸多建设难题。

近年来，钢箱梁顶推施工跨越运营主要有高铁轨道^[3-4]、高速公路^[5-6]、城市道路^[7]等地面交通路网合建项目，上述研究主要集中在城市道路与轨道交通合建设计方面，但对于大量并线运营地铁桥梁顶推施工技术方面研究较少。目前，国内顶推施工设计大部分集中于施工技术与研究^[8]，

对于钢箱梁顶推施工标准化设计流程研究相对较少。

本文以合肥市文忠路“复杂城市环境下紧邻运营地铁高架桥施工关键技术与风险控制研究”项目中高架桥钢箱梁顶推施工工程为技术背景，对钢箱梁顶推施工方法及设计展开研究。对导梁、支架、滑道等施工关键设施进行设计，并采用 Midas/Civil 建立各节段钢箱梁施工有限元模型，展开各节段钢箱梁步履式顶推施工全过程模拟，通过分析钢箱梁主梁、导梁以及临时墩在施工过程中的应力与变形规律，达到控制顶推施工过程中的风险因素、保证结构施工全过程安全的目的。

1 工程概况

文忠路提升工程 1 期南起郎溪路，向北与新海大道、天水路、新汴河路交叉，上跨淮南铁路线，后与泗水路、岱河路、学林路、淮海大道、学府路、龙子湖路交叉，终至少荃街。文忠路 1 标段施工预留场地狭小，同时由于紧邻运营地铁及地铁上盖荷载限制，给现场施工带来诸多不便与制约。其中 Z1 联、Z9 联、Z10 联、Z11 联、Z24 联、Z25 联以及匝道 LNW1 联均存在现场空间狭小、与运营地铁大量并线或重叠的情况，现场情况如图 1 所示。

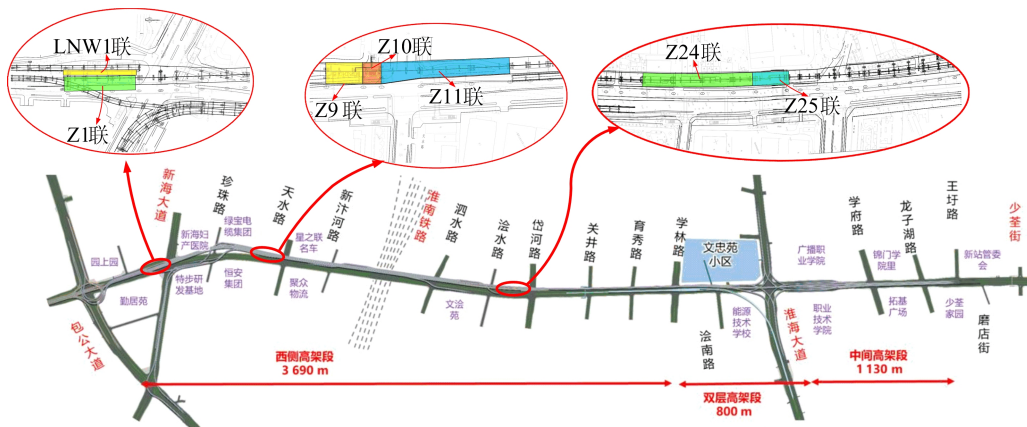


图 1 文忠路紧邻运营地铁节段示意图

Z1 联东侧南北向跨越新海大道地铁站，为 0 号~3 号墩((28+51+48) m)三连跨，北侧 3 号墩毗邻新海大道，桥位跨越新海大道地铁站房，其中 1 号~3 号墩西侧为地铁通风井和地铁出入口。整联总质量约为 2 044.4 t。LNW1 联匝道

起点位于新海大道南侧，主线第 2 联接口，终点位于包公大道主路，南北向跨越新海大道地铁风井和地铁出入口，为 0 号~2 号墩((48+51) m)两连跨。Z9、Z10 联结构高度为 2.2~2.4 m，东侧为文忠路主路，西侧为工业厂房，北侧为天水路与

文忠路交口,南侧为同步施工 Z8 联满堂支架普通钢筋混凝土现浇箱梁。Z9 联跨越勤劳村地铁站风亭,总长度为 55 m 总质量约为 1 280.5 t, Z10 联上跨地铁 3 号线勤劳村站 3 号出入口,总长度为 27 m,总质量约为 540 t,南侧为浚水路(在建),东侧为运营的文忠路快速路,并且与 Z10 联毗邻的 Z11 联同步进行悬拼施工。Z24、Z25 联结构高度分别为 2.8、3.2 m,顶面设东西双向 2% 泄水坡。北侧为文忠路及与岱河路的交口,依次跨越地铁文汇苑地铁站风井及 4 号出入口,Z24 联为 64 号~67 号((60+58+62) m)三连跨,整联总质量约为 3 000 t,Z25 联为 68 号~69 号墩(63 m)单跨,整联总质量约为 1 100 t。

2 钢箱梁施工方案选取

钢箱梁施工方案的选择一般需要考虑 2 个方面因素:① 钢箱梁所处的施工环境;② 钢箱梁自身的结构特点^[8]。城市高架桥钢箱梁分为吊装、悬拼拼装、顶推等施工方式,在实际施工过程中,需结合实际现场情况选取最为合适的施工方式以保证施工安全及工程质量。

文忠路与地铁并线且跨越地铁上部出风亭或出站口的 Z1 联、Z24 联、Z25 联钢箱梁节段施工场地均由于东西向毗邻已有建筑物及在营城市道路,南北向无较大障碍物导致横向施工场地狭小、纵向施工场地富余。LNW1 联、Z9 联、Z10 联则因南北向同步进行现浇混凝土箱梁满堂支架施工或毗邻在营城市道路导致纵向施工场地狭小,横向施工场地富余。且因运营地铁地铁区间段既有线路车流量大、上部荷载限值及已有建筑等场地环境因素的限制不允许完全封道施工,传统吊装等需持续使用大型起吊设备的施工方式并不适用本项目施工,同时钢箱梁自身刚度大,可将临时墩间距设置较大,以此避开桥下不利地形和既有道路障碍物,而顶推施工方式有以下优点:① 顶推施工能有效避开地铁上部出站口以及出风亭,保证施工过程中不会使二者产生损毁;② 避免持续使用大型起吊设备对与钢箱梁并线或重叠的地铁上部土体产生较大压力;③ 各项推节段相邻节段可同时进行施工,有效缩短施工周期。

综上所述,文忠路高架项目跨地铁出风亭或出站口的各节段钢箱梁施工拟采用顶推施工方式。而顶推施工可分为步履式顶推施工和累积滑移顶推施工。结合现场施工环境和钢箱梁结构自身特点,Z1 联、Z24 联、Z25 联均为等截面箱梁,采

用步履式顶推施工,因场地因素 Z25 联先于 Z24 联进行施工;LNW1 联、Z9 联、Z10 联均由于南北纵桥向场地限制,且 Z9 联、Z10 联均为变截面箱梁,故采用累积滑移顶推施工,由于 Z10 联北侧的 Z11 联采用同步悬拼施工,因此 Z10 联需先于 Z9 联进行施工以便与 Z11 联进行合龙,各联施工方式见表 1 所列。

表 1 各节段钢箱梁施工方式

节段编号	施工方式	顶推类型
Z1	整体步履式顶推施工	多点顶推
LNW1	累积滑移顶推施工	多点顶推
Z9	累积滑移顶推施工	多点顶推
Z10	累积滑移顶推施工	多点顶推
Z24	分段拼装步履式顶推施工	多点顶推
Z25	分段拼装步履式顶推施工	多点顶推

3 钢箱梁顶推施工设计

通过对钢箱梁顶推施工设计确定各钢箱梁节段顶推设施及顶推设施布置,包括导梁的长度、刚度、断面尺寸、与主梁的连接构造及临时墩的结构形式和间距^[9-11],流程如图 2 所示。

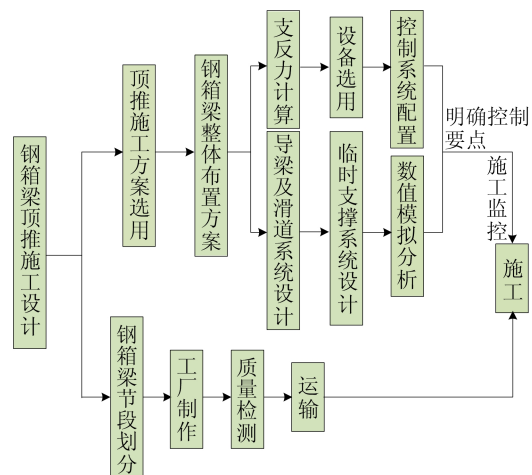


图 2 钢箱梁顶推施工设计流程图

钢箱梁顶推施工时,主梁是以各组顶推装置为支点的连续梁,当主梁位置确定时,支点反力与跨径和各支点相对高程有关,因此进行施工总体布置设计在考虑场地环境影响的同时应保证各项推点的受力以及稳定性。

3.1 顶推施工总体布置

以 Z25 联、Z10 联为例,Z25 联考虑其周围施工环境、主梁刚度等因素,该联顶推沿纵向共设置 5 个顶推点,每个顶推点下设置 2 个顶推墩,每个

顶推墩上布置 1 台顶推设备, 共计投入 10 台设备。自临近 68 号永久墩的临时墩开始编号, 分别记为轴线 L1~L5, 其中轴线 L1、L2 间为地铁 3 号线文浚苑站 4 号出站口。各轴线之间距离分别为 62.1、13.0、19.0、15.0、11.4 m, 且在 70 号永久墩与 L4 间、71 号永久墩北侧分别设置 1 联与

2 联临时拼装支架以用于钢箱梁拼接时临时支承。Z10 联设置两道顶推支撑与 1 个拼装支撑, 每个顶推支撑上布置 1 台顶推设备, 两端顶推支撑距离为 16.5 m, 中部拼装支架距离两端顶推支架距离分别为 13.0、3.5 m, 同时拼装支架位于地铁出站口西侧, 二者总体布置如图 3 所示。

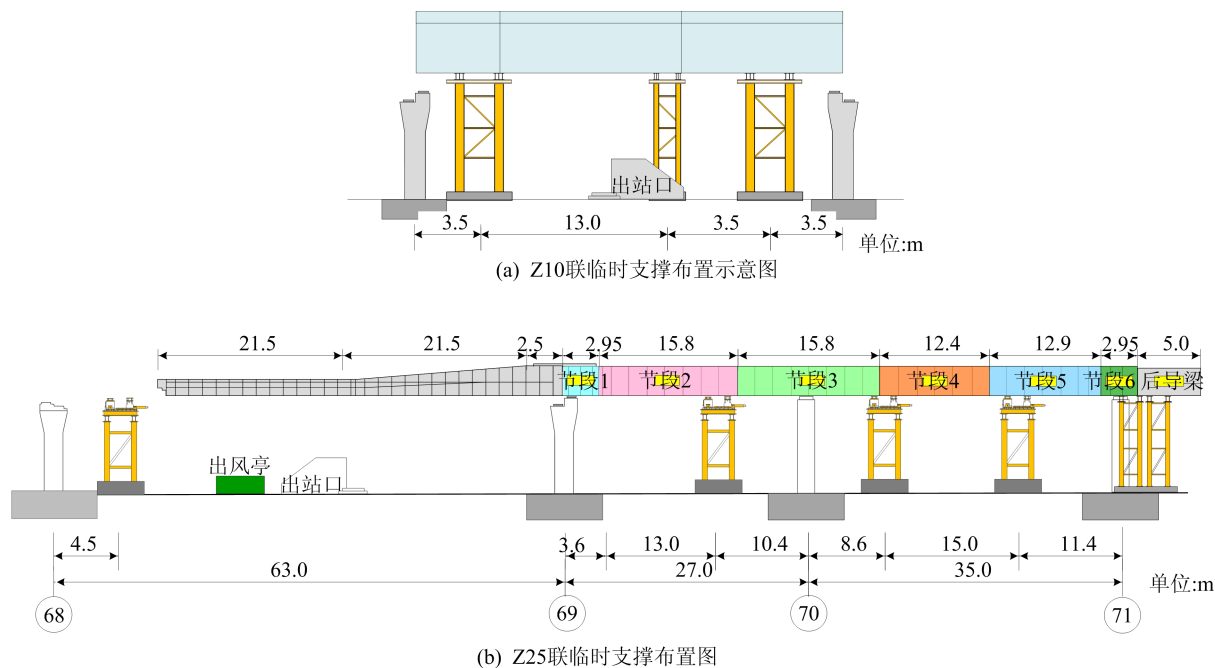


图 3 钢箱梁临时支撑布置示意图

3.2 顶推设备选用

顶推动力系统可分为步履式顶推动力系统、滑移式顶推动力系统。根据《钢结构滑移施工技术标准》(T/CSCS 009—2020)^[12]与《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)^[13]规定, 各项推点的顶推力设计值不应小于各滑移支点克服的摩擦力之和的 1.25~2.00 倍; 为控制主梁竖向位移所产生的附加应力, 防止梁体开裂, 单点顶升力不得大于计算反力的 1.10 倍, 计算公式为:

$$F_i = K \left(\sum_{j=1}^i \mu G_j \cos \theta + \kappa \sum_{j=1}^i G_j \sin \theta \right) \quad (1)$$

其中: F_i 为第 i 个顶推点所需顶推力; j 为第 j 个顶推点所带动的滑移支点数量; G_j 为第 j 个滑移支点对滑轨的法向作用效应设计值; μ 为滑移支点上的摩擦系数。自然轧制表面, 经除锈并充分润滑的钢与钢表面之间的滑动摩擦系数取 0.12~0.15; 滚动滑移系数取 0.05~0.10; 顶推力富余系数 K 取 1.25~2.00; θ 为滑移轨道与水平面的夹角, 不宜大于 6° ; κ 为滑移状态系数, 上坡滑移时取 1.0, 下坡滑移时取 -1.0。

对于步履式顶推施工, 不同施工工况下各支

点反力可通过数值模拟软件 Midas/Civil 建立钢箱梁整体模型并进行施工模拟, 采用“梁不动墩动模型”^[14], 即改变钢箱梁约束点位置模拟顶推施工过程中钢箱梁与临时墩的相对位置, 获得钢箱梁顶推施工过程中各轴线位置临时墩在不同施工工况下的支反力数据。以 Z25 联钢箱梁模拟结果为例, Z25 联顶推施工过程包含顶推施工、拼装钢箱梁节段与后导梁等过程, 各轴线单个临时墩支反力见表 2 所列。

表 2 Z25 联支反力计算结果 单位: kN

轴线	L1	L2	L3	L4	L5
支反力最大值	3 833	6 399	1 237	3 335	3 223

根据平截面假定, L1~L5 各轴线单点临时支墩的最大支反力分别为 3 833、6 399、1 237、3 335、3 223 kN。通过支反力确定 Z25 联顶推设备参数, 本次顶推施工拟采用顶升器满足《液压缸》(JB/T 10205—2010)^[15]中规定的 2 种型号步履式顶推机, 具体参数见表 3 所列, 构造如图 4 所示。

表 3 顶推设备参数

名称	参数
外形尺寸	底座:2 750 mm×950 mm×200 mm; 整体:930 mm×1 810 mm×1 285 mm
顶推油缸	额定压力 25 MPa;设计压力 31.5 MPa; 顶推能力 600 kN/800 kN;行程 1 000 mm
顶升油缸	额定压力 25 MPa;设计压力 31.5 MPa; 顶升能力 5 000 kN/8 000 kN;行程 200 mm
纠偏油缸	额定压力 25 MPa;设计压力 31.5 MPa; 纠偏能力 1 000 kN;行程 100 mm

同时,步履式顶推机的千斤顶和置换墩与钢梁的支撑梁强度需满足结构安全要求,并且为避免腹板失稳,可采取钢梁接触面设柔性垫块,增加板厚、增设加劲肋等方式减小局部压应力^[16],防止对钢梁产生破坏。

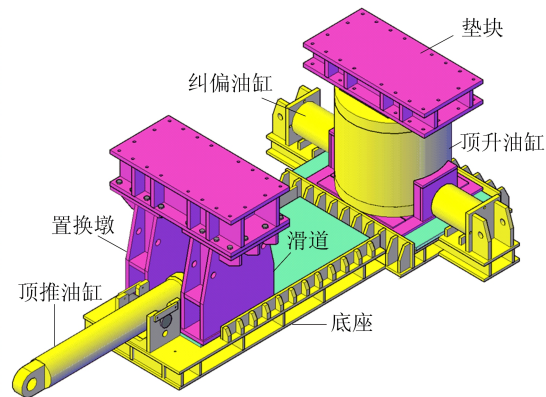


图 4 顶推设备示意图

对于累积滑移式顶推施工,钢箱梁相对滑靴静止,可采用一般简支梁模型计算其各支点反力。根据顶推点的布置以及顶推设备的数量来配置泵源的数量,且可进行多个模块的组合,每套模块以一套泵源系统为核心,可独立控制一组步履顶推设备,同时可进行多顶推点扩展,以满足实际顶推滑移工程需要。本文选用额定功率为 60 kW 的 TJV-60 型液压泵源。依据 Z25 联顶推工况,需要同时使用 7 台液压泵源,总功率为 180 kW。

3.3 顶推临时支撑系统设计

临时墩作为顶推施工过程中钢箱梁向下部土体传递压力的结构,除承受上部结构的竖向作用力外,还需承受风载、因顶推不同步产生的水平作用力。因此临时墩的设计需作为施工设计中的重要因素进行考虑,其形式应与顶推方式、施工高度、场地环境有关。不同顶推施工方式所需临时墩不同,需对步履式顶推施工以及累积滑移顶推

施工临时墩进行设计。

3.3.1 步履式顶推施工临时支撑设计

对于施工高度较低的步履式顶推施工,无需设置顶推支架,可直接将顶推动力设备置于临时硬化基础之上。此时需考虑临时支墩在最大荷载工况下的抗冲切能力和变形沉降情况,以保证顶推施工的承载安全、稳定性和施工精度^[17]。以依托项目 Z1 联步履式顶推施工为例,施工高度小于 3 m,无需设置顶推施工支架,此时将混凝土临时硬化基础作为临时支墩,对其进行相应设计。

计算选取 F 轴单侧临时基础即整桥荷载最大位置,基础示意图如图 5 所示。以单点荷载 3 900 kN 进行验算,不考虑偏心受力,基础尺寸为 4.0 m×7.0 m×0.8 m,抗冲切力主要公式为:

$$F_1 \leq \beta_{hp} \beta_0 \mu_m f_t h_0 \quad (2)$$

$$F_1 = F - \sum_i Q_i \quad (3)$$

$$\beta_0 = 0.84 / (\lambda + 0.2) \quad (4)$$

其中: F_1 为荷载作用下用于冲切破坏锥体上的冲切力设计值; f_t 为承台混凝土抗拉强度设计值; β_{hp} 为承台冲切承载力截面高度影响系数, $h \leq 800$ mm 时,取值 1.0, $h \geq 2 000$ mm 时,取值 0.9, 其间按线性内插法取值; μ_m 为承台冲切破坏锥体一半有效高度处周长; h_0 为承台冲切破坏锥体的有效高度; β_0 为柱(墙)冲切系数; λ 为冲跨比, $\lambda = a_0 / h_0$, a_0 为柱(墙)边或承台变阶处到桩边水平距离;当 $\lambda < 0.25$ 时, λ 取 0.25;当 $\lambda > 1.0$, λ 取 1.0; F 为竖向荷载设计值; Q_i 为荷载效应基本组合下冲切破坏锥体内各桩或复合桩反力设计值。计算结果显示,当冲切荷载(618.3 kN)小于 2 965.8 kN,基本满足抗冲切设计要求。

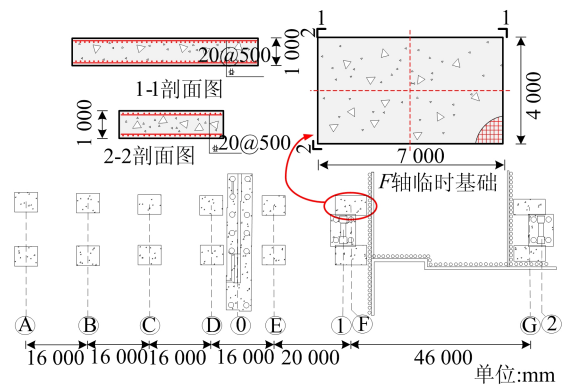


图 5 F 轴临时基础示意图

对于施工高度较高或有跨越既有道路、建(构)筑物、涉水要求时,应设计顶推临时支架。其

中,采用步履式顶推的临时支架应进行强度、刚度和稳定性计算;而采用滑移式顶推的临时支架还应进行支架的强度、刚度和稳定性验算。

Z24 联、Z25 联钢箱梁施工高度超过 3 m,则需架设临时支架。以 Z25 联为例,临时拼装支架结构由分配梁及支架组成,分配梁采用双拼工字钢 I 40a 制作。临时支架为 2 m×4 m 的井字架,采用 $\phi 426 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管,中部横、斜撑采用槽钢 16a 连接形成整体。临时支架结构底部纵向放置混凝土条形基础,尺寸为 3.5 m×1.0 m×0.5 m,由 C30 混凝土浇筑,内置双层钢筋网片。顶推临时支架采用格构式支撑塔架,立柱中心线纵横距为 3 m×3 m,立柱采用 $\phi 609 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管,立柱高度约为 6 m。在距离立柱顶 0.5、4.5 m 位置设置水平连系杆件(连接系间距可根据支架高度适当减小),水平连系杆件间采用斜撑连接,连系杆件尺寸为 $\phi 273 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管。立柱底与柱顶焊接 800 mm×800 mm×20 mm 钢板,立柱顶沿横桥向布置双拼 HN700 mm×300 mm 型钢,垂直方向布置五拼 HN700 型钢,型钢上部沿纵桥向放置顶推装置。临时支撑塔架沿桥横断面方向对称布置,塔架中心距为 10.3 m。Z25 联 L2、L3 下部混凝土扩大基础为 5.6 m×7.0 m×1.5 m,L1、L4、L5 下部混凝土扩大基础为 5.6 m×7.0 m×1.2 m,均采用 C30 混凝土浇筑,Z25 联临时支撑系统,如图 6 所示。

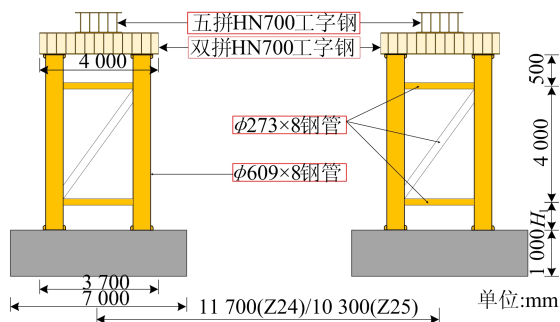


图 6 Z25 联临时支撑构造图

3.3.2 累积滑移顶推施工临时支撑设计

以 Z10 联为例,其临时支撑构造图如图 7 所示。临时拼装支架由分配梁和临时支架组成,采用热轧 H 型钢 HM440 mm×300 mm×11 mm×18 mm 及其以上的规格制作;临时支架为 2 m×2 m 的井字架,采用 $\phi 273 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管,中间横、斜撑采用角钢 L75 mm×75 mm×5 mm 连接成整体。滑移临时支架横梁(分配梁)采用热轧

H 型钢双拼 HM440 mm×300 mm 或其以上的规格制作,支架立柱采用 $\phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 螺旋焊管,中间横、斜撑采用 10 槽钢连接成整体。底部采用 4 块至少规格为 16 mm×600 mm×600 mm 钢板铺垫,四周采用至少 4 个 M16 mm×150 mm 膨胀螺栓与混凝土基础固定。

临时支架立柱下投影面四边向外延伸 1 m 范围进行地基处理,换填砂砾石(换填厚度不小于 500 mm,密实度达到 96%,地基承载力不低于计算值)后密实度不低于 90%,再在上部浇筑 20 cm 厚的 C30 混凝土,并设置 1 500 mm×3 000 mm×180 mm 钢垫板,与 L75 mm×5 mm 角钢进行焊接限位,角钢与混凝土基础采用 M16 mm×150 mm 膨胀螺栓固结。

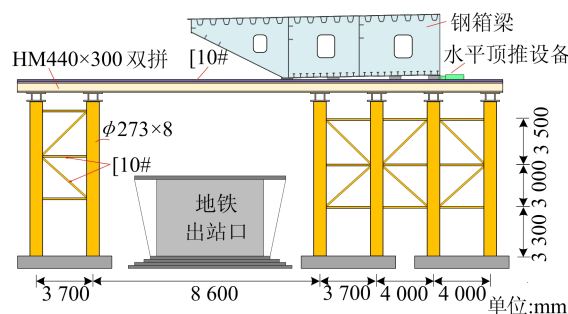


图 7 Z10 联临时支撑构造图

3.4 钢导梁及滑道系统设计

针对不同施工方式,分别对步履式顶推施工钢导梁和累积滑移顶推施工滑道进行设计。

3.4.1 步履式顶推施工钢导梁设计

在步履式顶推施工过程中,钢梁会出现悬臂工况,为避免钢梁悬臂长度过大导致钢箱梁节段局部应力过大、倾覆的情况,满足钢箱梁的受力要求,需设置顶推导梁。导梁长度一般取用顶推最大跨径的 0.6~0.8 倍,并且导梁刚度取用钢箱梁主梁的 1/15~1/9 倍^[18]。

以 Z25 联为例,本联为简支结构,最大顶推跨径为 62.1 m,导梁长度设计 45.0 m,约为顶推最大跨径的 0.72 倍,前导梁结构采用 2 片纵向工字形分段变截面主梁,横向间距 10.3 m,设置 3 道横向联系空间桁架,桁架弦杆采用 I32 型钢,腹杆采用 14 型槽钢,后导梁采用 2 片纵向“王”字形等截面主梁(3 200 mm×600 mm×12 mm),设置 1 道横向平面桁架,桁架弦杆采用 I32 型钢,腹杆采用 14 型槽钢,导梁根部较钢箱梁高出 200 mm,并在钢箱梁顶板正上方加焊 2 m 长 T 形构件,其高度为 200 mm,顶板厚为 20 mm,腹

板厚为 12 mm, 保证与连接的导梁板件厚度一致, 导梁前端 1 m 长度范围为高差 0.5 m 台阶;

导梁与钢箱梁之间通过对应板件的对接焊, 实现等强连接, 构造示意图如图 8 所示。

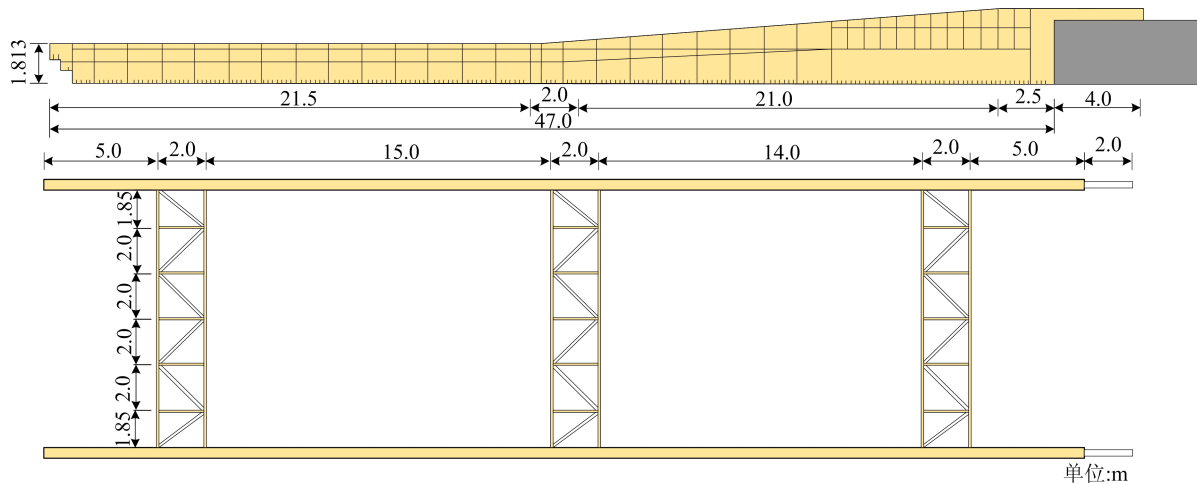


图 8 Z25 联导梁示意图

3.4.2 累积滑移施工滑道及滑靴设计

滑移轨道根据滑移方式可选用钢轨、槽钢等, 并应在滑移终点的端头增加长度或采取设置挡板等防脱措施。布置时应当考虑项目特点、滑移结构自重以及下部支承结构情况进行确定。

LNW1 联 0 号、2 号墩处滑道梁采用热轧 HN800 mm×300 mm×14 mm×26 mm 内增两道腹板和加劲肋的组合箱型钢; 1 号墩处滑道梁为将上述单拼型钢组合焊接的双拼型钢, 并在滑道上下拼缝间增设宽度 400 mm×20 mm 平钢板围焊, 钢板材质均为 Q235B。滑道梁与钢箱梁间设滑靴和钢轨, 滑靴采用 HM588 mm×300 mm×12 mm×20 mm 型钢制作, 与钢轨刚性接触, 两侧设限位挡块, 上端与钢箱梁底部腹板焊接, 焊接支点在钢箱梁的中腹板两侧均匀布设, 支点间距 2 900 mm, 支点位于横隔板位置并对隔板进行局部加固; 钢轨采用规格为 43 kg/m 的轨道, 轨道与滑道梁用轨道压板固定, 爬行器自锁装置与钢轨进行连接, LNW1 联钢箱梁滑靴及滑道如图 9 所示。

Z9 联、Z10 联滑道梁采用 2 组 H600 mm×300 mm×10 mm×16 mm 型钢、1 组 H600 mm×200 mm×10 mm×16 mm 型钢组焊形成 600 mm×600 mm 的组合钢梁, 上表面设置 30 槽钢, 内部铺设 260 mm×3 mm 不锈钢板并在其上表面涂抹锂基脂, 以减小顶推过程中的摩擦力。槽钢侧边设置 5 组耳板, 每组为 2 块半圆带槽口耳板, 耳板间距 1 m。滑道梁与钢箱梁间布置规格为

250 mm×250 mm×500 mm 的滑块, 采用 16 mm 钢板组焊而成的框架结构。

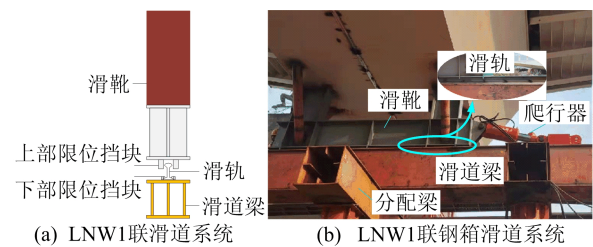


图 9 LNW1 联顶推滑道系统

3.5 控制系统设计

控制系统包括泵源液压系统、电气控制系统和同步控制系统组成, 其中: 泵源液压系统和电气控制系统保证顶推施工器械正常工作; 同步控制系统保证顶推施工同步性, 保证整体施工安全以及精度要求。

同步控制系统由泵站驱动模块、反馈模块、网络模块和传感器采集模块组成, 可以实现施工过程中的监测反馈和施工后的校验检查, 是顶推施工顺利安全进行的重要保障。以 LNW1 联为例, 爬行器上设置行程传感器、压力传感器以及位移传感器。

同步控制系统可实现以下功能: ① 集群顶推作业动作协同控制, 计算机通过信号反馈控制多点顶推爬行器协调运动, 保持同步滑移姿态, 实现同步滑移; ② 操作人员可通过计算机同步系统人机界面进行滑移油压、滑移距离等相关数据观察或指令发布等, 具体流程如图 10 所示。

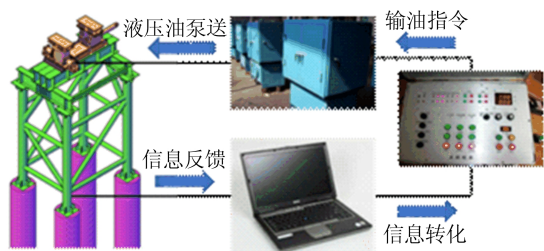


图 10 顶推各系统工作机制示意图

4 顶推施工模拟与监测控制

4.1 施工模拟

为明确钢箱梁顶推施工钢箱梁主体与各系统受力变形情况,为施工监测与风险控制提供理论依据,采用 Midas/Civil 建立构件模型并计算分析。通过计算各类构件在顶推施工过程中的应力、位移等因素的变化,明晰施工过程中的应力、变形控制点,为现场实际监控提供理论依据,模型包括钢箱梁主体、临时支撑系统,其示意图如图 11 所示。

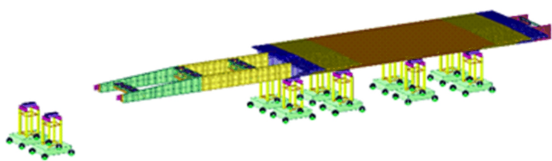


图 11 Z25 联钢箱梁模型示意图

文忠路高架钢箱梁桥紧顶推施工紧邻运营地铁既有线路,上部施工荷载对既有轨道、土壤的扰动应力、钢箱梁主体应力与变形为关注重点,因此根据现行桥梁规范和实际施工现场条件,参考设计图纸,确定该模型荷载情况如下。

1) 恒载:即桥梁结构自重,为考虑实际节点重量,在计算模型中将杆件总重量乘以 1.2。

2) 活载:考虑桥面临时施工荷载(包括电焊机、氧气瓶等)作用于顺桥向梁节点上,梁单元线荷载均为 1.0 kN/m。

3) 风载:按照《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)^[13]设计风荷载为 6 kN/m²。

4) 温度荷载:考虑±30℃的温度变化。

5) 荷载组合:1.35 恒载+1.00 施工荷载; 1.35 恒载+升温; 1.35 恒载+降温; 1.35 恒载+1.0 施工荷载+升温; 1.35 恒载+1.00 施工荷载+降温。

结合现场情况,以 Z25 联钢箱梁顶推施工过程为例,该模型共有 628 个节点,759 个单元材料采用《桥梁用结构钢》^[19]中规定的 Q345qD 和 235 钢材,

共 15 个等截面组和 2 个变截面组;接触方面主梁与导梁、导梁与桁架等部分均使用刚性连接,主梁与下部分配梁使用弹性连接,混凝土基础约束其转动与竖向平动。施工工况划见表 3 所列。

表 3 Z25 联钢箱梁步履式顶推施工工况

工况	工况条件
工况 1	1.1: 顶推 15.0 m 尾部未离开 L5 号墩
	1.2: 顶推 15.0 m 尾部离开 L5 号墩
工况 2	拼装节段 4
工况 3	3.1: 顶推 13.5 m 尾部未离开 L5 号墩
	3.2: 顶推 13.5 m 尾部离开 L5 号墩
工况 4	拼装节段 5、6
工况 5	5.1: 顶推 4.0 m
	5.2: 拼装后导梁
工况 6	6.1: 顶推 13.5 m 尾部未离开 L5 号墩
	6.2: 顶推 13.5 m 尾部离开 L5 号墩,导梁到达 L1 号墩
工况 7	7.1: 顶推 16.0 m 尾部未离开 L4 号墩
	7.2: 顶推 16.0 m 尾部离开 L4 号墩
工况 8	8.1: 顶推 19.0 m 尾部未离开 L3 号墩
	8.2: 顶推 19.0 m 尾部离开 L3 号墩
工况 9	9.1: 顶推 8.0 m 钢箱梁未上永久墩
	9.2: 顶推 8.0 m 钢箱梁上永久墩
工况 10	顶推 6.0 m 就位

由施工模拟结果可知,Z25 联钢箱梁顶推施工应力最不利工况为工况 8.2,即钢箱梁顶推尾部离开 L3 号墩,此时转换为四点顶推,且钢箱梁前端即将到达 L1 号临时支墩,由于弯矩作用使得钢箱梁与前导梁末端接缝处应力达 143.2 MPa。位移最不利工况为工况 6.1,即导梁前端未到达 L1 号临时墩,其挠度值为 -264 mm,小于 $L/400 = 283$ mm。满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)中对于 Q345 钢材强度与梁的挠度控制规定,挠度及应力分布如图 12 所示。

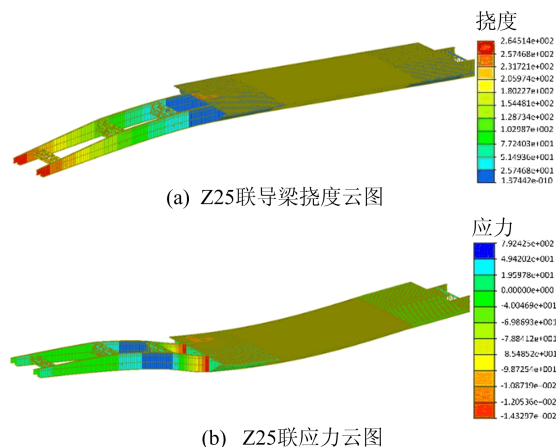


图 12 Z25 联顶推模拟结果

4.2 顶推施工控制要点与施工监测

通过准确识别钢箱梁顶推施工安全影响因素,并采取合理有效的措施进行控制,是钢箱梁顶推施工控制中的重要环节^[20]。钢箱梁施工控制主要包括线形控制、应力控制、稳定控制以及风险控制,各控制手段如图 13 所示。

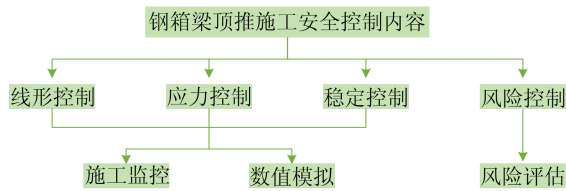


图 13 钢箱梁顶推施工安全控制内容

钢箱梁顶推施工安全控制方法主要有预测控制法、事后调整控制法、自适应调整法。本项目具体体现在设计上通过数值模拟提前预测钢箱梁不利位置,并对不利位置进行优化;施工中采用各种监测手段对潜在不利位置进行施工全过程监测,并在施工中不断纠偏、调整,以保证施工安全。

开展施工监测能够及时掌握钢箱梁、导梁、临时墩的结构变形与受力规律以及上部结构施工荷载对既有轨道、土壤的扰动应力和变形影响;调整、优化施工中因各种不确定因素导致的偏差;保证施工过程中结构与人员安全^[21]。根据施工模拟结果及现场实际情况,对文忠路高架钢箱梁桥顶推施工进行全过程监控。

以 Z25 联为例,本次监测内容主要为钢箱梁施工过程中的线形、应力以及基础沉降等要素监测。线形监测包括主梁水平向轴偏以及导梁竖向挠度监测,其中轴偏监测保证钢箱梁主梁施工精度,竖向挠度监测保证顶推施工安全;挠度测点位于导梁端部即施工过程中挠度最不利工况位置。应力监测直接关系到施工过程中的结构安全,同时也是结构施工控制中的预警系统,应力测点主要集中于导梁与钢梁接缝、应力最不利工况位置以及位于单点反力最大轴的临时支撑系统等。此外,紧邻运营地铁施工,为保证上部结构施工对在营地地铁隧道以及地铁隧道周围土体附加应力的影响,亦要进行临时基础沉降监测^[20]。

根据现场实测,Z25-D1 与 Z25-D2 挠度监测值变化规律相同,工况 1.1 至工况 5.1 其先逐步增大,后迅速减小,工况 7.1 后又一次变小,导梁下挠度最大值为-235.4 mm,且监测值小于模拟值(-250.8 mm),误差为 10%左右,模拟结果与

监测结果的吻合良好,主梁挠度对比如图 14 所示。图 14 中:Z25-S 为 Z25 联导梁数值模拟结果;Z25-D1、Z25-D2 分别为 Z25 联导梁挠度监测值。

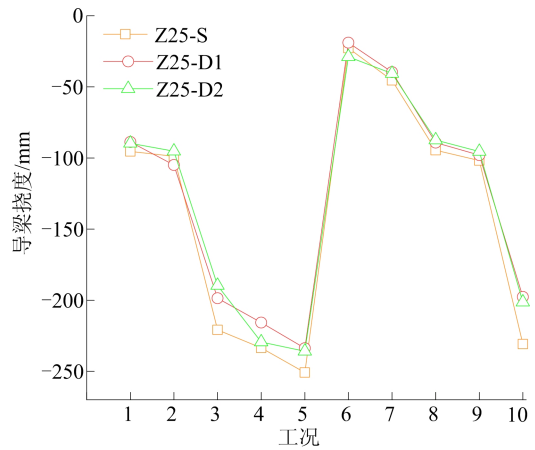


图 14 Z25 联导梁挠度值对比示意图

Z25 联钢箱梁顶推施工过程中,钢箱梁与导梁接缝最大应力工况出现于工况 5,即钢箱梁导梁未到达 L5 号轴临时墩,处于最大悬臂状态,此时接缝处应力达到最大。导梁到达临时墩上后应力减小,但随着钢箱梁顶推过程的进行,导梁悬臂长度再次增加,因此自工况 6 开始导梁与钢箱梁接缝处应力再次逐步增大直至钢箱梁到位,如图 15 所示。图 15 中:Z25RS、Z25RF、Z25RX 分别为 25 联钢箱梁与右导梁接缝处测点;Z25LS、Z25LF、Z25LX 分别为 25 联钢箱梁与左导梁接缝处测点。

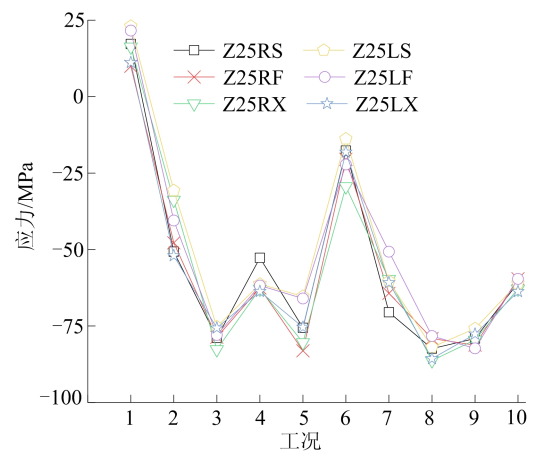


图 15 Z25 联钢箱梁应力值示意图

顶推开始至结束,Z25 联 L5 号轴临时基础沉降总体趋势为逐步增大,工况 8 后其沉降值增长

速度变快,原因是 L5 号轴临时基础竖向荷载逐步增大直至工况 8 达到峰值,此时累积沉降达到 16 mm,之后由于钢箱梁继续前进,临时支撑数量减少,由多点支撑体系转换为四点支撑,L5 号轴竖向荷载增大,因此沉降增幅变大,最大沉降值为 53 mm,小于文献[17]和文献[22]中规定的不产生附加应力结构的沉降限值 0.005l,如图 16 所示。图 16 中,工况 0 表示无任何工况条件。

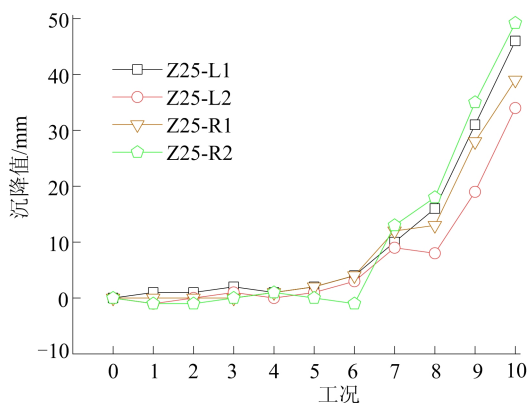


图 16 Z25 联临时基础沉降观测值

5 结 论

1) 本文基于紧邻运营地铁文忠路高架桥项目,明确了钢箱梁顶推施工重、难点问题,获悉运营地铁隧道上部土体承压能力、通风亭与出站口等场地环境条件对顶推施工的限制,确立了顺桥向步履式顶推及横桥向累积滑移顶推施工方法。

2) 针对在场地环境限制条件下,考虑文忠路高架桥钢箱梁不同顶推施工特点,开展钢箱梁顶推施工方案布置和顶推施工设计分析,明确顶推动力系统、导梁和支撑系统、滑动系统、控制系统的基本设计原则,并依托案例验证了方案的可行性。

3) 通过计算软件 Midas/Civil 对场地环境限制下文忠路高架桥钢箱梁顶推施工全过程进行精细化数值模拟,得到各阶段钢箱梁顶推施工过程中最不利施工工况,为现场监测提供科学依据。

4) 基于顶推工况数值分析,开展场地环境限制下文忠路高架桥钢箱梁顶推施工的全过程监测技术研究,明确顶推施工监测的关键布置要点,建立了顶推施工的关键控制内容与指标,保证施工安全;同时验证了数值仿真的准确性和可靠性。

变化与展望[J]. 可持续发展经济导刊,2021(增刊 2):41-44.

- [2] 徐家钰,王凤丽,杜海明. 道路工程[M]. 3 版. 上海:同济大学出版社,2015.
- [3] 彭仕国. 跨铁路钢箱梁顶推施工技术[J]. 铁道标准设计,2009(7):45-47.
- [4] 刘东. 跨越既有高速铁路桥梁施工方案及防护设计研究[J]. 桥梁建设,2010(6):70-72,76.
- [5] 纪强. 跨越高速公路桥梁钢-混凝土组合梁施工方案研究[J]. 北方交通,2022(1):1-4.
- [6] 柴加兵. 市政高架桥跨越高速公路桥梁施工方案比选[J]. 北方交通,2022(9):28-31.
- [7] 杨庆琪. 跨越多层立交大跨径、宽截面钢箱梁整体式顶推施工技术[J]. 世界桥梁,2015,43(4):20-24.
- [8] 曲江峰. 重庆鹅公岩轨道交通悬索桥边跨钢箱梁顶推施工技术[J]. 铁道建筑,2018,58(10):27-30.
- [9] 付永乐. 通惠河桥钢箱梁顶推施工技术[J]. 铁道建筑,2007,47(3):8-10.
- [10] 韩胜利. 大跨高墩钢箱梁多点同步顶推技术[J]. 世界桥梁,2012,40(6):24-28.
- [11] 涂满明. 洪山庙大桥钢箱梁顶推施工技术[J]. 铁道建筑,2003(6):13-15.
- [12] 中国钢结构协会. 钢结构滑移施工技术标准:T/CSC S 009—2020[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2020:1-10.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020:1-417.
- [14] 谢祺. 步履式顶推施工工艺对钢箱梁局部受力的分析研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [15] 中华人民共和国工业和信息化部. 液压缸:JB/T 10205—2010[S]. 北京:机械工业出版社,2010:1-9.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:1-241.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:1-120.
- [18] 周永兴,何兆益. 路桥施工计算手册[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015:1-10.
- [20] 曹樟海. 钢箱梁桥顶推施工安全分析与控制研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [21] 何振涛. 跨高速公路钢箱梁步履式顶推施工监测与数值分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:1-25.

(责任编辑 吴 亮)

[参 考 文 献]

- [1] 陆化普,张永波. 可持续发展视角下我国交通强国建设成就