

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.11.026

# 城市大跨径钢箱梁设计与施工研究

樊星辰, 黄从俊

(合肥市规划设计研究院, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 随着经济发展和城市化进程加速,我国市政桥梁建设发展迅猛,特别是大跨径桥梁逐渐增多。以合肥市繁华大道改造工程上跨既有高架(100 m 主跨)钢箱梁为背景,结合国内外规范和标准,介绍了大跨钢箱梁的设计思路和方法;并结合项目特点,进行施工方案比选,详细阐述了多点步履式顶推施工方案。通过建立 MIDAS 空间有限元模型分别进行了对顶推施工过程和成桥状态的验算分析。结果表明:首先,针对大跨钢箱梁的设计及计算应综合国内外现有规范和标准;其次,施工前应加强方案论证比选工作,因此基于有限元模型的不利工况下模拟验算是十分有必要的。

**关键词:** 大跨钢箱梁;市政桥梁设计;顶推施工;MIDAS建模;有限元分析

中图分类号: U442.5+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0113-05

## 0 引言

我国桥梁建设发展迅猛,当跨径需求较大时,特别是在市政道路交口位置,钢箱梁因其跨越能力强、施工快捷等优势应用更广泛。目前我国对钢箱梁的结构形式、受力分析等有着大量深入的研究<sup>[1]</sup>。

在施工方面,当需要跨越重要河流或道路等障碍物时,顶推施工法是较为主流的选择。世界上最早的顶推施工工艺可追溯到上世纪 60 年代,应用于德国人建造的 Ager 桥<sup>[2]</sup>。我国起步稍晚,已知国内最早的顶推施工项目为狄家河桥<sup>[3]</sup>。自我国改革开放以来,经济快速发展,城市建设速度大幅度提升,市政工程建设在保证安全的同时更加重视效率。经过几十年的技术实践,顶推施工工艺得到了广泛应用,已成为复杂施工场景下的第一解决方案<sup>[4-5]</sup>。钢箱梁由于其自重轻、易运输、工厂化程度高的特点,应用顶推施工工艺的案例更普遍。

本文以繁华大道引江济淮段中东引桥跨越方兴大道联桥梁(该节点于 2022 年底已完工,现场照片如图 1 所示)为背景,通过对钢箱梁的构造设计研究、结构计算研究及对顶推施工的研究进行介绍,为我国市政大跨钢箱梁的建设提供借鉴。

收稿日期: 2023-12-15

作者简介: 樊星辰(1988—),男,硕士,高级工程师,从事道路桥梁规划设计工作。



图 1 工程现场图(建成后)

## 1 项目概况

繁华大道自东向西横跨合肥肥东县、合肥主城区(包河区、经开区)与合肥肥西县,是连接“两县两区”的重要交通通道。其中,本项目是繁华大道(将军岭路-杭埠路)上的改造工程,该段全长约为 9.5 km,项目位置如图 2 所示。

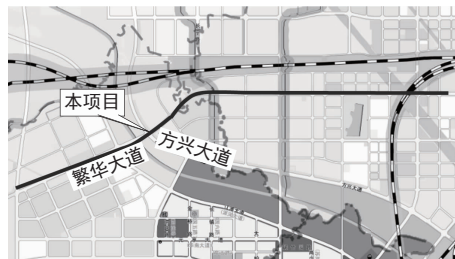


图 2 项目位置图

上部结构采用(57.5+100+57.5)m 钢箱梁,分为南北两幅,每幅桥宽 13.5 m,中跨跨越现状方兴大道

高架,方兴大道高架宽度为32 m,与线路夹角约70°,现场照片见图1。本桥是合肥市已建成的拥有最大主跨跨径的钢箱梁。

方兴大道是贯穿合肥“四区一县”、通向新桥机场及沪蓉高速的快速通道。全线为城市快速道路,主干道设计速度为80 km/h。桥位处道路现状为双向8车道跨线桥,桥上车流量大、交通繁忙。本次上跨方兴大道段采用多点步履式顶推施工,其余节段采用节段吊装施工。

钢箱梁采用等截面单箱双室截面,呈封闭式箱形截面,箱梁中心线处梁高4 m,钢材材质为Q345qD。桥面板采用正交异性板结构,一般断面顶底板板厚18 mm,端中横梁附近加厚至28~36 mm。顶板等宽范围的纵向加劲肋采用U型肋,间距为600 mm。底板等宽范围的纵向加劲肋采用倒T型肋,间距为350 mm。横隔板一般间距3.0 m,板厚均为16 mm。支点处横梁受较大集中荷载需要加厚横梁,中横梁隔板板厚28 mm,端横梁板厚28 mm。纵桥向腹板一般段的板厚均为20 mm,加厚段加厚至28 mm,每条边腹板上设有6道板式纵向加劲肋,在中腹板设有4道板式纵向加劲肋,钢箱梁的平立剖面图如图3(a)~3(c)所示。

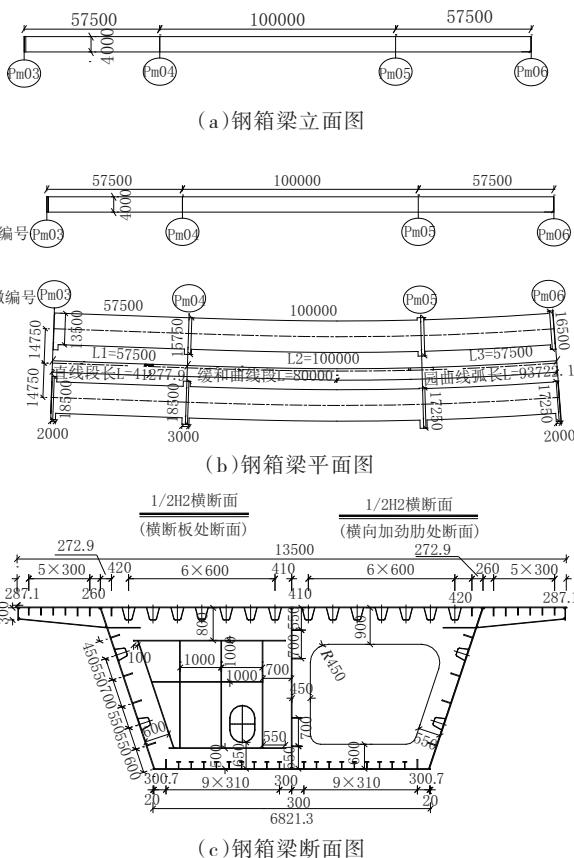


图3 钢箱梁的平立剖面图(单位:mm)

## 2 钢箱梁设计研究

### 2.1 构造研究

腹板宜设置车道中间位置,避开车轮轮迹线,以提高结构疲劳性能,避免裂缝发展<sup>[6]</sup>。

参考由日本道路协会制定的《道路桥示方书同解说(钢桥编)》<sup>[7]</sup>,压屈验算公式如式(1)所示(轴向应力 $\sigma$ 和 $\tau$ 剪力共同作用):

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 \leq \left(\frac{1}{v_B}\right)^2 \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 、 $\tau$ 分别为材料所受轴向应力和剪应力,MPa; $\sigma_{cr}$ 、 $\tau_{cr}$ 分别为受纯弯曲作用和纯剪力作用时的各自强度值,MPa,其计算方式分别如式(2)、式(3)所示。

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{h}\right)^2 \quad (2)$$

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_w}{h}\right)^2 \quad (3)$$

式中: $E$ 为钢材弹性模量,MPa; $\mu$ 为材料泊松比; $h$ 为腹板高,mm; $t_w$ 为腹板厚,mm; $k_{\sigma}$ 、 $k_{\tau}$ 为压屈系数, $k_{\sigma}=232.9$ , $k_{\tau}$ 的计算方式如式(4)所示。

$$k_{\tau} = \begin{cases} 5.34 + \frac{4}{(L/h)^2}; & (L/h > 1) \\ 4 + \frac{5.34}{(L/h)^2}; & (L/h \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

整理后如式(5)所示。

$$v_B \left(\frac{h}{100t_w}\right)^4 \left[ \left(\frac{\sigma}{18k_{\sigma}}\right)^2 + \left[\frac{\tau}{18k_{\tau}}\right]^2 \right] \leq 1 \quad (5)$$

结合纵向加劲肋项目中的相关公式,可得出下列结果。

按照以下公式验算(设有两道纵向加劲肋, $L/t_w < 1.5$ , $L \geq 60t_w$ ):

$$\left(\frac{h}{100t_w}\right)^4 \left\{ \left(\frac{\sigma}{3000}\right)^2 + \left[\frac{\tau}{187+58(L/h)}\right]^2 \right\} \leq 1 \quad (L/h > 0.64)$$

$$\left(\frac{h}{100t_w}\right)^4 \left\{ \left(\frac{\sigma}{3000}\right)^2 + \left[\frac{\tau}{140+77(L/h)}\right]^2 \right\} \leq 1 \quad (L/h \leq 0.64)$$

式中: $L$ 为横向加劲肋间距,mm; $h$ 为腹板高,mm; $t_w$ 为腹板厚,mm; $\sigma$ 为腹板翼缘压应力值,MPa; $\tau$ 为腹板剪应力值,MPa。

考虑本桥采用顶推施工工艺,故在导梁落墩之前,主梁处于悬臂状态,腹板处的拉压应力显著且复杂,因此本次在边腹板部分采用U肋作水平加劲肋以保证安全储备,如图4所示。

正交异性桥面板设计:随着市政交通荷载增加,重载交通频次逐年上升。桥面铺装易过早出现病害,因此近年来采取增加桥面板厚度、增大U肋尺寸及

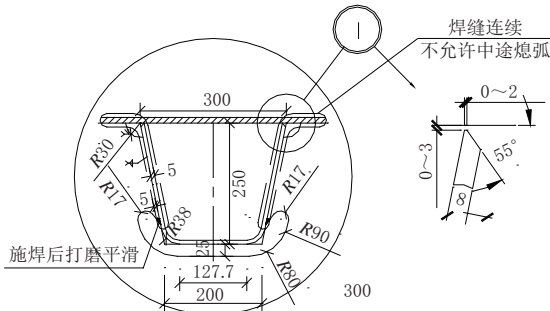


图4 腹板U肋大样(单位:mm)

厚度的措施对提高桥面板整体刚度是极为必要的<sup>[8]</sup>。本桥正交异性桥面板U肋大样如图5所示。

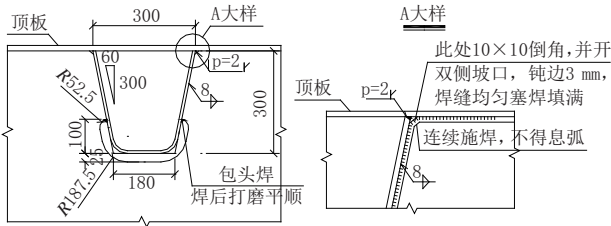


图5 正交异性桥面板U肋大样(单位:mm)

### 2.2 计算分析

综合采用日本道路协会制定的《道路桥示方书同解说(钢桥编)》<sup>[7]</sup>、英国桥梁规范(BS5400)<sup>[9]</sup>及《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)<sup>[10]</sup>中的规定对成桥阶段的全桥整体进行分析验算。

采用MIDAS Civil软件进行建模分析:主梁采用梁单元,全桥共划分为113个单元,材料为Q345钢,验算各板件所受正应力,如图6所示。顶板所受应力包括第一体系、第二体系应力,底板仅受第一体系应力。鉴于篇幅,本次仅列出计算结果:顶、底板的第二体系应力分布如图7、图8所示,汇总后的应力表如表1所示。可见,各板件所受应力值均满足规范要求。

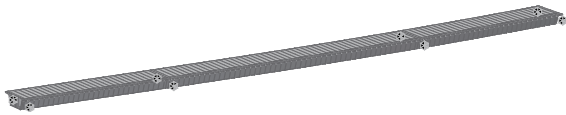


图6 MIDAS有限元模型

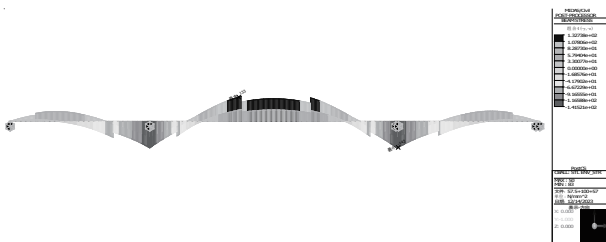


图7 成桥状态顶缘正应力包络图(第一体系)(单位:MPa)

## 3 顶推施工研究

### 3.1 施工方案比选

本桥跨越既有方兴大道高架,高架桥宽32m,与

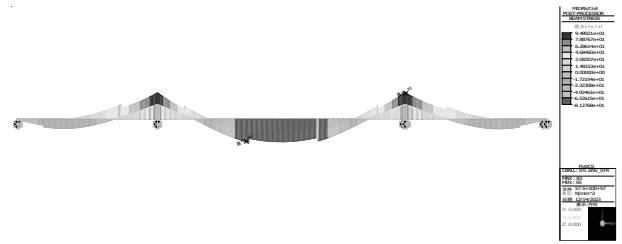


图8 成桥状态底缘正应力包络图(第一体系)(单位:MPa)

表1 成桥状态运营期应力汇总表

荷载工况		应力数值 /MPa	
第一体系	最大拉应力	94	
	最大压应力	82	
顶板	第二体系	最大拉应力	71
		最大压应力	50
第一体系 + 第二体系	最大拉应力	165	
	最大压应力	132	
底板	第一体系	最大拉应力	135
		最大压应力	143

路线夹角73°,路线位于缓和曲线段。为保证桥下的交通不中断,提供三种施工工艺进行选择,如表2所示。

表2 施工工艺介绍及对比

施工方案	工艺简介	技术特点
传统吊装施工	钢箱梁节段现场拼接,跨越段整片吊装,空中转体接力,完成钢梁架设	施工周期短;设备投入少;对周边空间要求高;施工安全冗余度小
拖拉式顶推施工	在墩柱、临时支墩的墩顶设置千斤顶及滑道,通过前方墩顶的牵引装置拖拉梁体在滑道前进,完成梁体安装	施工周期一般;设备简单,运输方便,工艺成熟;横向纠偏能力一般;安全冗余度一般
步履式顶推施工	在墩柱、临时墩顶等多处设置液压顶推装置,通过循环反复“顶+移+降”的动作完成钢梁安装	施工周期一般;设备复杂,对现场环境要求高;机械化程度高;施工精准性好,安全冗余度大

针对本项目所处环境,三个方案均可实施。本次基于施工风险性和对曲线钢梁线形的控制以及纠偏效果<sup>[11]</sup>等方面最终选择步履式顶推施工工艺。

### 3.2 施工工艺介绍

本桥采用多点式步履式顶推施工工艺,施工的主要流程具体如下。

步骤一:核查改迁场地管线,施工顶推支架;依次吊装中跨钢梁2#节段至5#节段,并在钢梁前端安装20m钢导梁,导梁安装时前端悬出Ly4临时墩中心线5m,保证顶推时钢梁尾部悬臂不超过20m;顶推一段距离后再在钢梁尾部拼装后续相邻的一个节段,即6#节段,如图9(a)所示。

步骤二:各临时墩与步履顶同步顶推钢梁跨越

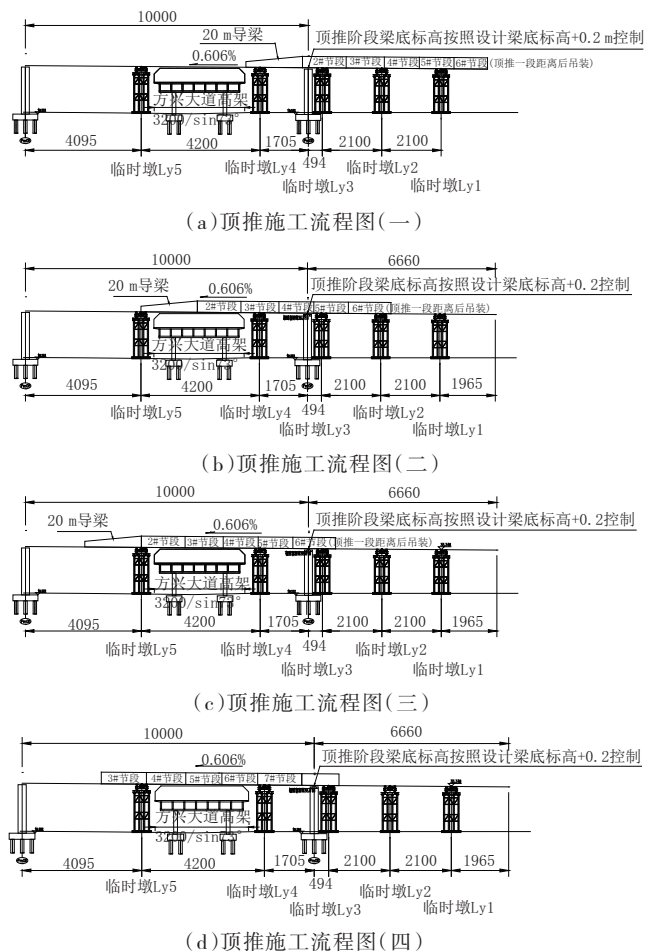


图9 步履式顶推施工工艺(单位:cm)

方兴大道高架桥,顶推 37 m 后导梁前端到达 Ly5 临时墩,进行导梁上墩,如图 9(b)所示。

步骤三:在导梁上墩后,对钢梁横向偏位进行调整,及时进行吊装支架施工;继续同步顶推钢梁 12 m,在导梁越过临时墩 Ly5 后,通过汽车吊进行拆除,如图 9(b)所示。

步骤四:吊装中跨钢梁剩余节段,完成中跨钢梁安装,如图 9(d)所示。

导梁长度 20 m,为上下两层主梁加连接系形式。采用双拼 700 × 300 × 14H 型钢, @1 000 竖向加劲;导梁宽度为桥底板宽度,导梁伸入箱室内与箱室节段加劲焊接。主梁间竖向连接系采用 400 × 400 × 14H 型钢立柱,用 Φ273 × 6 圆管斜撑。主梁间横向连接系采用 Φ325 × 8 和 Φ273 × 6 圆管支撑。导梁根部与钢梁的顶、底、腹板采用熔透焊接连接,通过横向联系梁将两组纵梁连接组成为导梁主体结构。导梁的结构布置如图 10 所示。

顶推临时墩采用两组共 8 根 φ426 × 8 mm 的立柱作为支撑,立柱纵向间距为 3 × 1.65 m,横向间距为 2.65 m,立柱之间采用 I10 槽钢进行连接,在立柱

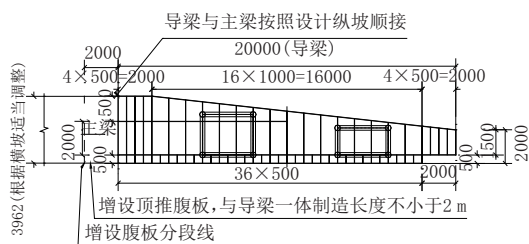


图10 导梁结构布置图(单位:mm)

顶端设置柱头进行加强,柱头上布置 2 根纵向分配梁 F3(双拼 HN700 × 300),在分配梁 F3 上布置 2 根横向分配梁 F2(双拼 HN700 × 300),在分配梁 F2 上布置 1 根纵向分配梁 F1(三拼 HN700 × 300)。钢箱梁顶推采用智能化三向千斤顶系统,综合考虑设计要求,钢梁最大承载力处的顶推设备采用 650 t。支墩及设备断面布置如图 11 所示。

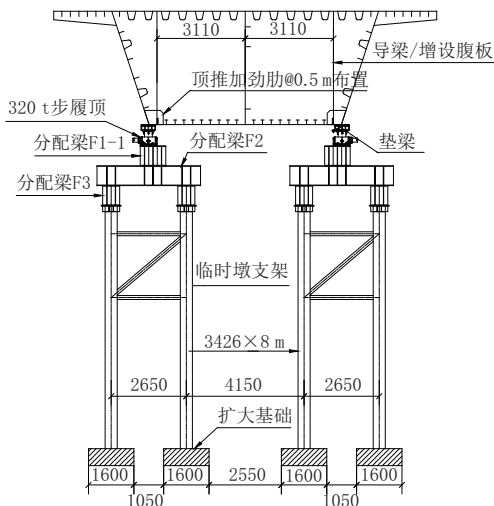


图11 顶推临时墩及设备断面布置图(单位:mm)

钢梁在顶推施工过程中,会随着道路曲线的走向而运动,由于钢箱梁各腹板线均不在同一缓和曲线上,其位置在顶进过程中会不断改变。因此在顶进施工期间需要时刻对钢箱梁的横向位置及时进行纠偏调整。根据墩顶布置,顶推阶段钢梁在 4 号和 5 号临时墩处的横向最大偏移量达 55 mm,故在墩顶将分配梁 F1 加宽为 3 拼 HN700 × 300,顶推时根据钢梁偏位情况,横向移动步履顶和垫块。

### 3.3 顶推验算分析

为了减少顶推时前端悬臂状态在高架桥上方的停留时间,后场一次拼装 5 个钢箱梁节段,整体顶推至钢梁前端到达 Ly5 临时墩后,拆除钢导梁,同时在钢梁尾端拼装一个节段,以减小 Ly4 临时墩受力。

随着顶推进程的不断变化,钢梁结构(包括主梁、导梁、支架等)的受力体系是动态变化的,同时每个部位、同一部位不同截面位置的应力也在不断变化。

本节通过 MIDAS 建模对顶推过程不同工况下的关键受力位置进行了验算分析,以保证顶推施工顺利安全实施,如图 12 所示。

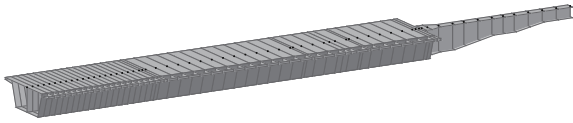


图 12 MIDAS 有限元模型

鉴于篇幅,本文仅列出了四个关键工况,并给出相应工况下主梁及导梁的最大应力结果,如表 3 所示。

表 3 关键工况计算汇总表

工况	描述	计算结果(最不利)
工况 1	钢梁导梁向前顶进,顶至临时墩前,导梁处于悬空状态,最大前悬臂 42 m	正应力: -44.7MPa(主梁下缘); 剪应力: 14.4MPa(主梁腹板) 变形: -38.7mm
工况 2	钢梁导梁上墩完成,导梁前端在临时墩上支承状态	正应力: -29.4 MPa(导梁上缘) 剪应力: 12.6 MPa(主梁腹板) 变形: -7.6 mm
工况 3	将拼装好的钢箱梁及钢导梁再次顶推 10 m,导梁 1/2L 处于悬臂状态	正应力: -44.3 MPa(导梁下缘); 剪应力: 13.8 MPa(主梁腹板) 变形: 5.4 mm
工况 4	顶推完成,上跨段全部落梁到达指定位置	正应力: -17 MPa(主梁下缘); 剪应力: 11.5 MPa(主梁腹板) 变形: -1.9 mm

据以上分析可知,钢箱梁所受最大正应力  $44.7 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa}$  (工况 1),所受最大剪应力  $14.4 \text{ MPa} < 155 \text{ MPa}$  (工况 1),满足要求。导梁所受最大正应力  $44.3 \text{ MPa} < 190 \text{ MPa}$  (工况 3),导梁在各工况下的最大剪应力均未超过主梁,满足要求。

### 4 结 语

钢箱梁造型优美、跨越能力强、施工标准化程度

高,被广泛用于市政工程。本文基于国内外规范及推荐做法,以合肥市繁华大道跨越方兴大道联 100 m 主跨钢箱梁为背景进行了研究分析,得到以下结论:

(1)对钢箱梁进行计算分析时,对于顶板(正交异性桥面板)应考虑双体系叠加,顶板作为应力控制板件,在整体初算时,应预留第二体系应力进行控制设计;

(2)钢箱梁顶推施工相较传统的支架吊装或悬臂拼装施工,应用场景更丰富且成熟,多点步履式顶推工艺对曲线钢箱梁的适用性较好,在施工前应做好工程部署,对顶进过程中的最不利工况、最不利位置等进行精细化验算。

### 参考文献:

[1] 吴冲.现代钢桥 - 上册[M].北京:人民交通出版社,2006.

[2] Xu M K. Incremental Launching Construction Method for Steel Truss Suspension Bridge[J].Advanced Materials Research,2011,1158(204-210):842-845.

[3] 佚名.狄家河大桥采用顶推法架梁的设计与施工(上)[J].铁道建筑,1979(4):3-6.

[4] 郝维索,吴东升.杭州江东大桥多段复合竖曲线钢梁顶推施工分析研究与实践[J].城市道桥与防洪,2010(10):112-116.

[5] 宫禄尧,杨培娜,邱唐虎.复杂交通状况下大跨立交桥钢箱梁施工关键技术[J].世界桥梁,2015(1):23-26.

[6] 陈鹏,张龙,文锋.大跨钢箱连续梁钢箱梁的设计思考[J].公路,2022,67(11):28-31.

[7] 日本道路协会.道路桥示方书同解说(钢桥编)[S].

[8] 赵廷衡,高宗余.桥梁钢结构细节设计[M].成都:西南交通大学出版社,2011.

[9] BS5400,英国桥梁规范[S].

[10] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

[11] 张晓东.桥梁顶推施工技术[J].公路,2003(9):45-51.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)